В. С. ПОПОВ
С. А. НИКОЛАЕВ

ЭЛЕКТРО ТЕХНИКА

В. С. ПОПОВ и С. А. НИКОЛАЕВ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1966 ЛЕНИНГРАД

УДК 621.3 (07)
П 58

Содержание книги соответствует программе курса электротехники для техникумов неэлектротехнических специальностей.

В книге рассматриваются основные вопросы расчета цепей постоянного и переменного токов, краткая теория измерения электрических и неэлектрических величин, нормальные электрические машины и трансформаторы, электрические машины, применяемые в схемах автоматического контроля и регулирования. Излагаются основные вопросы электропривода, автоматики, электрического освещения, передачи и распределения электрической энергии. Приведены сведения по вычислительным устройствам и электротехнологии.

Книга предназначена для студентов техникумов неэлектротехнических специальностей.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга является учебником по электротехнике для техникумов неэлектротехнических специальностей.

Первые четыре главы книги в основном содержат материал курса физики, который должен быть известен учащимся, приступающим к изучению электротехники и который достаточно хорошо изложен в учебниках физики для техникумов и, в частности, в книге Л. С. Жданова и Н. И. Хлебникова (издание 1961 г.). Исключением являются параграфы книги 1-9, 1-18, 1-19, 3-6, 3-13, 3-14, 4-6 и 4-7.

Авторы считают целесообразным и полезным материал этих глав изложить в самой сжатой форме с тем, чтобы дать учащимся возможность повторить этот материал перед изучением электротехники или освежить ту или иную часть его при изучении какого-либо раздела электротехники.

Обилие материала электротехники и необходимость включить в книгу вопросы новой техники: электронику, электрические машины автоматических устройств, основы электроавтоматики, вычислительные устройства, электротехнологию и т. д., при очень ограниченном объеме книги естественно вызвали необходимость держаться сжатой формы изложения материала.

В этой книге авторы кратко осветили также вопросы электротехнических материалов и, в частности, вопросы электроизоляции, необоснованно опускавшиеся в ряде учебников, издававшихся ранее.

Авторы полагают, что для неэлектротехнических специальностей вопросы производства электроэнергии не являются актуальными, поэтому в учебнике не рассмотрены электрические станции.

Авторы выражают благодарность А. Д. Смирнову за большую работу по редактированию книги и ее оформлению.

Авторы просят читателей направлять критические замечания по книге в издательство «Энергия» по адресу: Москва, Ж-114, Шлюзовая набережная, 10.

Авторы

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3
Введение 11

Глава первая. **Электрическая цепь постоянного тока**

1-1. Основные понятия 13
1-2. Электрическое напряжение 14
1-3. Электрический ток 16
1-4. Электрическая цепь и ее элементы 17
1-5. Закон Ома 20
1-6. Электрическое сопротивление и проводимость . . . 21
1-7. Зависимость электрического сопротивления от температуры 24
1-8. Электропроводность 25
1-9. Проводниковые материалы 27
1-10. Работа и мощность 30
1-11. Преобразование электрической энергии в тепловую 32
1-12. Допустимый ток в проводе. Защита от перегрузки 34
1-13. Первое правило Кирхгофа 35
1-14. Соединение приемников энергии (сопротивлений) 36
1-15. Двухпроводная линия 41
1-16. Два режима работы источника питания 42
1-17. Второе правило Кирхгофа 44
1-18. Расчет сложных электрических цепей 45
1-19. Нелинейные электрические цепи 48
1-20. Лабораторная работа. Потеря напряжения в линии 51

Глава вторая. **Химические действия тока**

2-1. Электрический ток в электролитах 52
2-2. Гальванические (первичные) элементы 54
2-3. Аккумуляторы (вторичные элементы) 57
2-4. Соединение источников питания 61

Глава третья. **Электромагнетизм**

3-1. Магнитная индукция. Магнитный поток 63
3-2. Электромагнитная сила 66
3-3. Взаимодействие проводов с токами 69
3-4. Магнитная проницаемость 70
3-5. Напряженность магнитного поля. Магнитное напряжение 71

3-6. Закон полного тока 72
3-7. Магнитное поле катушки с током 73
3-8. Электромагнитная индукция 75
3-9. Принцип работы электрического генератора . . . 80
3-10. Принцип работы электродвигателя 81
3-11. Вихревые токи 83
3-12. Намагничивание ферромагнетиков 85
3-13. Ферромагнитные материалы 89
3-14. Расчет магнитной цепи 92
3-15. Электромагниты 94
3-16. Индуктивность. Электродвижущая сила самоиндукции 95
3-17. Энергия магнитного поля 97

Глава четвертая. **Конденсаторы. Электрическая изоляция**

4-1. Электрическая емкость. Конденсаторы 99
4-2. Соединение конденсаторов 101
4-3. Энергия электрического поля 103
4-4. Диэлектрик в электрическом поле 104
4-5. Газ в электрическом поле 108
4-6. Электрическая изоляция 111
4-7. Электроизоляционные материалы 113

Глава пятая. **Переменный ток**

5-1. Период и частота переменного тока 119
5-2. Получение синусоидальной э. д. с. 120
5-3. Сдвиг фаз 123
5-4. Векторная диаграмма 125
5-5. Действующие значения тока и напряжения . . . 127
5-6. Общие замечания о цепях переменного тока . . . 129
5-7. Цепь с сопротивлением 130
5-8. Цепь с индуктивностью 131
5-9. Цепь с активным сопротивлением и индуктивностью 135
5-10. Неразветвленная цепь с активными сопротивлениями и индуктивностями 140
5-11. Разветвленная цепь с активными сопротивлениями и индуктивностями 142
5-12. Цепь с емкостью 144
5-13. Резонанс напряжений 146
5-14. Резонанс токов 149
5-15. Коэффициент мощности 151
5-16. Активная и реактивная энергия 153
5-17. Лабораторная работа. Цепь переменного тока с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью 154
5-18. Лабораторная работа. Параллельное соединение катушки и конденсатора 155

Глава шестая. **Трехфазный ток**

6-1. Получение трехфазного тока 156
6-2. Соединение обмоток генератора звездой 158
6-3. Соединение обмоток генератора треугольником . . 160

6-4. Соединение приемников энергии звездой 161
6-5. Соединение приемников энергии треугольником 165
6-6. Включение приемников энергии в сеть трехфазного тока 169
6-7. Лабораторная работа. Четырехпроводная цепь трехфазного тока 170
6-8. Лабораторная работа. Трехпроводная цепь трехфазного тока 171

Глава седьмая. **Электроизмерительные приборы и измерения**

7-1. Основные понятия 172
7-2. Классификация электроизмерительных приборов . 173
7-3. Измерительные механизмы приборов 177
7-4. Измерение тока и напряжения 182
7-5. Измерение мощности 191
7-6. Измерение электрической энергии 196
7-7. Измерение сопротивлений 200
7-8. Измерение неэлектрических величин электрическими методами 205
7-9. Лабораторная работа. Измерение сопротивления изоляции 219
7-10. Лабораторная работа. Поверка индукционного счетчика 220
7-11. Лабораторная работа. Измерение мощности в цепи трехфазного тока 221
7-12. Лабораторная работа. Градуировка термоэлектрического пирометра и применение его для измерения температур 223

Глава восьмая. **Электрические машины постоянного тока**

8-1. Назначение машин постоянного тока 225
8-2. Устройство машины постоянного тока 225
8-3. Принцип действия машины постоянного тока . . . 228
8-4. Устройство обмотки якоря 229
8-5. Электродвижущая сила обмотки якоря 232
8-6. Момент на валу машины 233
8-7. Механическая мощность машины постоянного тока 234
8-8. Реакция якоря 234
8-9. Коммутация тока 236
8-10. Типы генераторов постоянного тока 241
8-11. Генератор с независимым возбуждением 242
8-12. Генератор с параллельным возбуждением 245
8-13. Генератор с последовательным возбуждением . . 246
8-14. Генератор со смешанным возбуждением 247
8-15. Параллельная работа генераторов 248
8-16. Электродвигатели постоянного тока 251
8-17. Электродвигатель с параллельным возбуждением 253
8-18. Электродвигатель с последовательным возбуждением 256
8-19. Электродвигатель со смешанным возбуждением . . 257
8-20. Потери и коэффициент полезного действия 259
8-21. Генераторы для электросварки 260
8-22. Трехщеточный генератор 261

8-23. Электромашинный усилитель (ЭМУ) 262
8-24. Схема генератор — электродвигатель (Г—ЭД) . . . 263
8-25. Лабораторная работа. Электродвигатель с параллельным возбуждением 265
8-26. Лабораторная работа. Генератор с параллельным возбуждением 266

Глава девятая. **Трансформаторы**

9-1. Назначение трансформаторов 267
9-2. Принцип действия и устройство однофазного трансформатора 268
9-3. Холостой ход трансформатора 271
9-4. Работа трансформатора под нагрузкой 274
9-5. Трехфазный трансформатор 277
9-6. Параллельная работа трансформаторов 279
9-7. Регулирование напряжения трансформаторов . . . 282
9-8. Многообмоточные трансформаторы 283
9-9. Автотрансформаторы 283
9-10. Измерительные трансформаторы 284
9-11. Потери энергии в трансформаторе и их определение 287
9-12. Коэффициент полезного действия трансформатора 288
9-13. Нагрев и охлаждение трансформаторов 289
9-14. Трансформаторы для электросварки 291
9-15. Газосветные трансформаторы 292
9-16. Лабораторная работа. Однофазный трансформатор 293

Глава десятая. **Асинхронные электродвигатели**

10-1. Назначение асинхронных электродвигателей . . . 293
10-2. Получение вращающегося магнитного потока . . 294
10-3. Обмотка статора 297
10-4. Обмотки ротора 300
10-5. Принцип действия асинхронного двигателя . . . 302
10-6. Скольжение ротора 303
10-7. Частота э. д. с. и тока в обмотке ротора 303
10-8. Электродвижущие силы обмоток статора и ротора 304
10-9. Сопротивления в обмотке ротора 304
10-10. Ток в обмотке ротора 305
10-11. Рабочий процесс асинхронного двигателя 305
10-12. Вращающий момент двигателя 306
10-13. Пуск в ход асинхронных двигателей 309
10-14. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя 313
10-15. Двухфазный и однофазный асинхронные двигатели 315
10-16. Потери и к. п. д. асинхронного двигателя 319
10-17. Улучшение коэффициента мощности сетей, питающих асинхронные двигатели 319
10-18. Лабораторная работа. Трехфазный асинхронный двигатель 320

Глава одиннадцатая. **Синхронные машины**

11-1. Назначение синхронных машин 321
11-2. Устройство и принцип действия синхронной машины 322

11-3. Работа трехфазного синхронного генератора под нагрузкой 324
11-4. Включение синхронных генераторов на параллельную работу 326
11-5. Параллельная работа синхронного генератора с сетью при неизменном токе возбуждения 328
11-6. Синхронный двигатель 329
11-7. Работа синхронной машины параллельно с сетью при меняющемся токе возбуждения. 330
11-8. Уход за электрическими машинами 332

Глава двенадцатая. **Электрические машины автоматических устройств**

12-1. Назначение машин 335
12-2. Исполнительный двигатель постоянного тока . . . 336
12-3. Двухфазный исполнительный двигатель переменного тока 339
12-4. Двухфазный асинхронный двигатель с ферромагнитным полым или массивным ротором 342
12-5. Однофазный асинхронный двигатель со встроенным пусковым сопротивлением 343
12-6. Однофазный синхронный реактивный двигатель 344
12-7. Трехфазный и однофазный синхронные гистерезисные двигатели 345
12-8. Универсальный коллекторный двигатель 346
12-9. Тахогенератор постоянного тока 347
12-10. Тахогенератор переменного тока с полым немагнитным ротором 348
12-11. Поворотные трансформаторы 349
12-12. Асинхронные машины для синхронной связи . . 352
12-13. Электрический вал 354

Глава тринадцатая. **Промышленная электроника**

13-1. Классификация и назначение электронных приборов 355
13-2. Электронные выпрямители малой мощности Фильтры 356
13-3. Ионные вентили средней мощности 361
13-4. Электропроводность полупроводников 365
13-5. Полупроводниковые выпрямители малой и средней мощности 368
13-6. Выпрямители большой мощности — ртутные выпрямители 374
13-7. Игнитрон 378
13-8. Инвертор 379
13-9. Трехэлектродная лампа 380
13-10. Четырех- и пятиэлектродные лампы 382
13-11. Электронные усилители 383
13-12. Транзисторы — полупроводниковые усилители . 388
13-13. Генераторы 391

13-14. Стабилизаторы 397
13-15. Электронно-лучевая трубка 399
13-16. Электронный осциллограф 402
13-17. Фотоэлементы. Фотосопротивления 402
13-18. Термосопротивления 408
13-19. Лабораторная работа. Полупроводниковые выпрямители 409
13-20. Лабораторная работа. Электронный осциллограф 411

Глава четырнадцатая. **Электропривод и аппаратура управления**

14-1. Система электропривода 416
14-2. Нагрев и охлаждение электрических машин . . 417
14-3. Выбор мощности при продолжительном режиме 418
14-4. Выбор мощности двигателя при кратковременном режиме работы. 420
14-5. Выбор мощности двигателя при повторно-кратковременном режиме работы 421
14-6. Аппаратура управления электродвигателями. . . 422
14-7. Рубильники 423
14-8. Пакетные выключатели 425
14-9. Реостаты для пуска и регулирования электродвигателей 427
14-10. Контроллеры 428
14-11. Плавкие предохранители 430
14-12. Воздушные автоматические выключатели (автоматы) 433
14-13. Контакторы 434
14-14. Реле 436
14-15. Магнитные пускатели 440
14-16. Масляные выключатели 441
14-17. Выключатели нагрузки 443
14-18. Магнитные усилители 444
14-19. Защитное заземление электротехнических установок 446

Глава пятнадцатая. **Основы электроавтоматики**

15-1. Общие понятия 449
15-2. Автоматическая защита при помощи реле 450
15-3. Автоматизация пуска двигателя постоянного тока параллельного возбуждения 451
15-4. Принцип построения схемы автоматического регулирующего устройства 452
15-5. Схема автоматического регулирования напряжения генератора 455
15-6. Обратная связь в системах автоматического регулирования 457
15-7. Автоматическое регулирование напряжения с помощью электромашинного усилителя 459
15-8. Схема стабилизации скорости вращения двигателя постоянного тока 460
15-9. Синхронно-следящий привод 461

Глава шестнадцатая. **Вычислительные устройства**

16-1. Назначение вычислительных устройств 463
16-2. Системы электронных вычислительных устройств 464
16-3. Аналоговые вычислительные устройства 465
16-4. Вычисления в моделирующих устройствах при помощи потенциометров 467
16-5. Назначение и общие сведения о цифровых вычислительных устройствах (ЦВУ) 470
16-6. Принцип построения ЦВУ 471
16-7. Взаимодействие отдельных блоков ЦВУ 473
16-8. Двоичная система счисления 474
16-9. Арифметические действия в двоичной системе. . . 475
16-10. Принцип работы некоторых элементов ЦВУ . . . 477
16-11. Принцип работы двоичного счетчика 482
16-12. Принцип работы сумматора арифметического устройства 483
16-13. Запоминающие устройства 487
16-14. Устройство ввода и вывода 492

Глава семнадцатая. **Электротехнология**

17-1. Общие сведения 494
17-2. Электрохимические методы 495
17-3. Электротермические методы 501
17-4. Электроэррозийная обработка 519
17-5. Ультразвуковая обработка 521
17-6. Электростатические установки 523

Глава восемнадцатая. **Электрическое освещение**

18-1. Основные понятия и единицы 528
18-2. Источники света 532
18-3. Осветительные приборы 536
18-4. Расчет электрического освещения 541

Глава девятнадцатая. **Передача и распределение электрической энергии**

19-1. Общие замечания о передаче электрической энергии 549
19-2. Линии и сети 554
19-3. Электроснабжение промышленных предприятий и цехов 560
19-4. Трансформаторные подстанции и распределительные устройства промышленных предприятий . . . 563
19-5. Расчет проводов 571
19-6. Устройство сетей внутри зданий 580
19-7. Уход за электроосветительными установками . . . 595

Приложение. Указания к проведению лабораторных работ . . . 597

ВВЕДЕНИЕ

Программа Коммунистической партии Советского Союза придает первостепенное значение электрификации как основному условию развития производительных сил нашей страны.

В настоящее время СССР по производству электрической энергии и установленной мощности электростанций занимает второе место в мире и первое в Европе. В ближайшем десятилетии электровооруженность труда в СССР должна увеличиться в 3 раза.

Программой КПСС предусмотрен рост производства электроэнергии в следующих размерах: в 1970 г. — 900—1 000 млрд. *квт·ч*, а в 1980 г. — 2 700—3 000 млрд. *квт·ч*. Установленная мощность электростанций должна быть к 1980 г. 540—600 млн. *квт* против 66,7 млн. *квт* в 1960 г.

Сформулированное В. И. Лениным в 1920 г. положение «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны» неуклонно осуществляется под руководством Коммунистической партии Советского Союза.

Изобилие дешевой электрической энергии позволяет совершенно по-новому поставить вопросы технологии производства и внедрения в жизнь достижений передовой науки.

Гениальное предвидение В. И. Ленина, указавшего на неисчерпаемость и бесконечность природы, находит подтверждение во всех областях электронной техники — полупроводниковой, молекулярной, квантовой и плазменной электронике.

Современная техника позволяет в настоящее время использовать в сложных электрических устройствах сотни тысяч транзисторов, диодов, сопротивлений, индуктивностей, конденсаторов и др., выполненных как пленочные микросхемы. Для производства этих микросхем используется электронно-лучевая и лазерная техника. Благодаря

электронной технологии осуществляется получение таких материалов, как вольфрам, молибден, тантал, ниобий и др. в сверхчистом состоянии, без которых невозможна современная техника.

Введение электричества непосредственно в зону обработки металлов создало новую отрасль технологии — электротехнологию.

Бурное развитие электронно-вычислительной техники позволяет не только усовершенствовать устройства автоматики и телемеханики, но и решать экономические задачи огромного народнохозяйственного значения.

Естественно, что даже для скромного ознакомления с современной техникой надо прочно овладеть основами прикладных наук и, в частности, одной из важнейших в современной технике — электротехникой.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1-1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Во всяком материальном теле содержится большое количество заряженных электрических частиц вещества — электрических зарядов. В электрически нейтральном теле содержится одинаковое число положительных и отрицательных частиц. В заряженном теле преобладают положительные или отрицательные заряды.

Единицей измерения заряда служит кулон ($к$). Электрический заряд мельчайшей частицы вещества — электрона составляет $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ $к$.

Разноименно заряженные тела притягиваются друг к другу, одноименно заряженные — отталкиваются. Взаимодействие зарядов объясняется тем, что каждый из них неразрывно связан с окружающим его электрическим полем. Таким образом, взаимодействие зарядов происходит при посредстве электрического поля. Электрическое поле обладает энергией — электрической энергией.

При перемещении заряженных частиц под действием сил электрического поля производится работа за счет энергии поля.

Электрически заряженные частицы вещества и электрическое поле представляют собой две неразрывно связанные формы материи.

Поле неподвижных зарядов называется электростатическим.

Величина, характеризующая свойство электрического поля в каждой точке его, называется напряженностью электрического поля ($\mathscr{E}$).

Напряженность поля выражается отношением силы поля F, с которой поле действует на точечный пробный

заряд q, помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда, т. е. напряженность поля

$$\mathscr{E} = \frac{F}{q}. \qquad (1\text{-}1)$$

При q, равном единице, $\mathscr{E}$ численно равно F, таким образом, напряженность электрического поля численно равна силе поля, действующей на электрический заряд, равный единице.

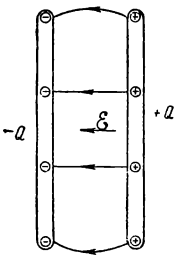


Рис. 1-1. Электрическое поле между двумя параллельными пластинами, заряженными разноименными зарядами.

Напряженность поля — векторная величина. Направление вектора напряженности совпадает с направлением силы поля, действующей на положительный заряд, находящийся в данной точке поля.

На рис. 1-1 показан вектор напряженности $\bar{\mathscr{E}}$ электрического поля между двумя параллельными пластинами с зарядами $+Q$ и $-Q$.

Электрическое поле графически изображается линиями напряженности электрического поля. Линия напряженности проводится так, чтобы в каждой точке ее вектор напряженности поля был направлен вдоль касательной к ней в этой точке. Линия напряженности электрического поля начинается на положительном заряде и оканчивается на отрицательном электрическом заряде, таким образом, она является не замкнутой.

Если через каждую единичную площадку, перпендикулярную к направлению линии, провести число линий, равное или пропорциональное напряженности поля в этой части, то линии напряженности можно использовать для оценки величины напряженности поля.

Поле называют о д н о р о д н ы м, если во всех точках его векторы напряженности равны друг другу. Примером может служить поле между параллельными пластинами (рис. 1-1) в области, достаточно удаленной от краев пластин.

1-2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

Если в однородном электрическом поле положительный пробный заряд q (рис. 1-2) под действием сил поля переместится из точки M в точку H на расстояние l в направле-

нии сил поля, то силами поля будет совершена работа

$$A = Fl,$$

или, приняв во внимание (1-1), работа

$$A = Fl = \mathscr{E}ql. \tag{1-2}$$

Величина, определяемая отношением работы, совершенной при перемещении заряда q между двумя точками поля (M, H) к перемещенному заряду, называется электрическим напряжением между указанными точками поля (M и H).

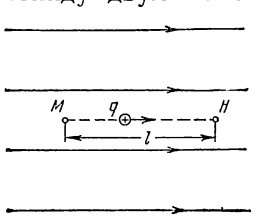


Рис. 1-2. Перемещение электрического заряда $+q$ в однородном поле.

Таким образом, напряжение

$$U = \frac{A}{q}.$$

Следовательно, напряжение между двумя точками численно равно работе сил поля при перемещении между этими точками единицы положительного заряда.

Применив формулу (1-2), можно написать:

$$U = \frac{A}{q} = \frac{\mathscr{E}ql}{q} = \mathscr{E}l. \tag{1-3}$$

Согласно ГОСТ 9867-61 с 1 января 1963 г. в СССР применяется Международная система единиц СИ (или SI). В этой системе приняты единицы: длины — метр (*м*), массы — килограмм (*кг*), времени — секунда (*сек*), силы — ньютон (*н*), работы — джоуль (*дж*), электрического заряда — кулон (*к*), электрического напряжения — вольт (*в*).

Как следует из выражения (1-3):

$$1\ в = \frac{1\ дж}{1\ к}.$$

Из выражения (1-3) напряженность электрического поля

$$\mathscr{E} = \frac{U}{l}, \tag{1-4}$$

откуда единица напряженности поля

$$[\mathscr{E}] = \frac{в}{м};$$

таким образом, напряженность электрического поля измеряется в вольтах на метр.

Напряжение между какой-либо точкой M электрического поля и точкой на поверхности земли называется потенциалом этой точки M поля относительно земли. Потенциал обозначается буквой φ и измеряется так же, как и напряжение, в вольтах.

Потенциал любой точки земли принимают равным нулю.

Потенциал произвольной точки поля численно равен работе, совершаемой силами электрического поля при перемещении положительного единичного заряда из этой точки в какую-либо точку на поверхности земли.

Если две точки поля, например M и H, имеют потенциалы $\varphi_м$ и $\varphi_н$, то при перемещении единичного положительного заряда от первой точки к второй работа, производимая силами поля, т. е. напряжение между точками M и H, равна разности потенциалов, т. е.

$$U_{мн} = \varphi_м - \varphi_н. \qquad (1\text{-}5)$$

При дальнейшем перемещении того же заряда из точки H до земли работа сил поля будет $\varphi_н$, а работа, произведенная силами поля при перемещении единичного заряда из точки M до земли, может быть выражена

$$U_{мн} + \varphi_н,$$

или, учитывая (1-5), можно написать:

$$U_{мн} + \varphi_н = \varphi_м - \varphi_н + \varphi_н = \varphi_м.$$

1-3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Свободные электроны в металлическом проводнике и ионы в электролите находятся в состоянии беспорядочного движения. Количество электричества, которое переносится при этом через какое-либо поперечное сечение проводника, в среднем равно нулю.

Если приложить электрическое напряжение к концам проводника, то на заряженные частицы будут действовать силы электрического поля, направленные вдоль проводника, и к скоростям беспорядочного движения их прибавится слагающая скорости, совпадающая с направлением сил поля. В этом случае через любое поперечное сечение проводника проходит определенное количество электри-

чества, т. е. в проводнике возникнет электрический ток.

Мерой интенсивности направленного движения заряженных частиц служит сила тока, измеряемая количеством электричества, которое проходит через поперечное сечение проводника за одну секунду. Если в течение некоторого времени ток остается неизменным как по величине, так и по направлению, то его называют постоянным током и обозначают прописной буквой I.

Если за время t через поперечное сечение проводника проходит количество электричества Q, то сила тока

$$I = \frac{Q}{t}. \tag{1-6}$$

В международной системе единиц (СИ) единицей силы тока служит ампер

$$1 \text{ ампер} = \frac{1 \text{ кулон}}{1 \text{ секунда}}, \quad \text{или} \quad 1a = 1 \frac{к}{сек}.$$

Таким образом, сила тока равна амперу, если через поперечное сечение проводника проходит заряд в 1 кулон за 1 секунду.

Положительное направление тока это направление, в котором перемещаются положительные заряды, или направление, противоположное движению электронов.

Отношение силы тока к площади поперечного сечения (S) проводника называется плотностью тока.

Таким образом, плотность тока

$$\delta = \frac{I}{S}. \tag{1-7}$$

1-4. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ И ЕЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Для получения электрического тока нужна электрическая цепь. В простейшем случае электрическая цепь состоит из трех основных элементов: источника питания, приемников электрической энергии или потребителей и соединительных проводов.

На рис. 1-3 показана схема, т. е. графическое изображение электрической цепи. Источник питания ($АГ$) считается внутренним участком цепи, вся остальная часть — внешним участком ее ($АБВГ$).

В табл. 1-1 приведены условные графические обозначения, применяемые в электрических схемах согласно ГОСТ 7624-62.

В источнике питания в процессе преобразования того или иного вида энергии в электрическую возбуждается электродвижущая сила — э. д. с. (E).

Электродвижущая сила численно равна энергии, полученной единицей заряда при перемещении ее от одного зажима источника до другого его зажима под действием внешних сил. Электродвижущую силу можно определить как напряжение источника, если к источнику не присоединены приемники или если источник не нагружен.

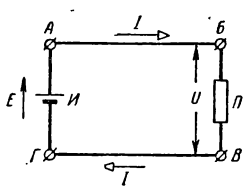


Рис. 1-3. Схема электрической цепи.

В потребителях электрическая энергия преобразуется в тепловую, механическую или какую-либо иную энергию. При этом напряжение U на зажимах потребителя численно равно энергии, которая теряется (преобразуется) при перемещении единицы заряда на участке потребителя.

Разность между э. д. с. E и напряжением U представляет собой ту часть энергии, которая теряется (преобразуется) при перемещении единицы заряда в самом источнике питания и называется внутренним падением напряжения (U_0), таким образом, можно написать:

$$E = U + U_0. \qquad (1\text{-}8)$$

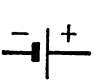
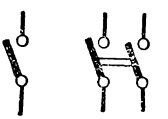
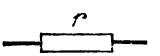
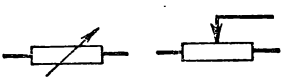
Передача энергии от источника питания к потребителю происходит при посредстве проводов. Потерей энергии в проводах, если они короткие, иногда пренебрегают, как это сделано и в нашем случае.

В качестве источников питания наиболее часто применяются электрические генераторы, преобразующие механическую энергию в электрическую, аккумуляторы и первичные элементы, преобразующие химическую энергию в электрическую.

Потребителями электрической энергии являются электродвигатели, преобразующие электрическую энергию в механическую, лампы накаливания, печи и нагревательные приборы, преобразующие электрическую энергию в тепловую, электрические ванны для получения металлов, в

Таблица 1-1

Условные графические обозначения, применяемые в электрических схемах (ГОСТ 7624-62).

1	Элемент гальванический (первичный) или аккумулятор	
2	Генератор постоянного тока	
3	Электродвигатель постоянного тока	
4	Лампа осветительная	
5	Провод, кабель, шина электрической цепи	
6	Соединение электрическое Соединение разъемное и неразъемное Соединение разъемное	
7	Выключатель однополюсный и двухполюсный	
8	Предохранитель плавкий	
9	Сопротивление (приемник энергии)	
10	Реостат	
11	Амперметр, вольтметр	

которых электрическая энергия преобразуется в химическую.

Провода применяются медные или алюминиевые, изолированные или голые, т. е. без изоляции.

Кроме основных элементов, в электрических цепях применяются выключающие устройства, например рубильники, выключатели, контакторы, приборы защиты, например предохранители и автоматы, наконец, контрольно-измерительные приборы: амперметры, вольтметры, счетчики и т. д.

1-5. ЗАКОН ОМА

Плотность тока в проводнике δ пропорциональна напряженности электрического поля $\mathscr{E}$, т. е.

$$\delta = \gamma \mathscr{E}.$$

Величина γ называется удельной электропроводностью. Она зависит от свойств материала провода и его температуры.

Для однородного электрического поля напряженность его

$$\mathscr{E} = \frac{U}{l},$$

откуда

$$\delta = \gamma \mathscr{E} = \gamma \frac{U}{l}.$$

Приняв во внимание, что $\delta = \frac{I}{S}$, можно написать:

$$\frac{I}{S} = \gamma \frac{U}{l}$$

или

$$I = \frac{\frac{U}{l}}{\gamma S} = \frac{U}{r}. \qquad (1\text{-}9)$$

Величина

$$r = \frac{l}{\gamma S} \qquad (1\text{-}10)$$

называется электрическим сопротивлением.

Таким образом, сила тока в проводнике прямо пропорциональна напряжению на его зажимах и обратно пропорциональна сопротивлению проводника.

Выражение (1-9) носит название з а к о н а О м а.

Обозначим сопротивление приемника энергии r (рис. 1-4), внутреннее сопротивление источника питания r_0, тогда согласно закону Ома для цепи, изображенной на рис. 1-4, можно написать:

$$U = Ir \quad \text{и} \quad U_0 = Ir_0,$$

или согласно (1-8):

$$E = U + U_0 = Ir + Ir_0 = I(r + r_0), \tag{1-11}$$

откуда ток в цепи

$$I = \frac{E}{r + r_0}. \tag{1-12}$$

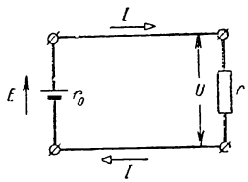


Рис. 1-4. Электрическая цепь.

Это соотношение выражает закон Ома для электрической цепи.

Напряжение на зажимах источника питания при замкнутой цепи

$$U = E - U_0 = E - Ir_0. \tag{1-13}$$

Напряжение на зажимах того же источника при разомкнутой цепи, когда ток в ней имеет нулевое значение, равно э. д. с. источника, так как

$$U = E - Ir_0 = E.$$

1-6. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ПРОВОДИМОСТЬ

Из выражения (1-9) следует, что сопротивление

$$r = \frac{U}{I}. \tag{1-14}$$

Полагая $U = 1$ *в* и $I = 1$*а*, получим единицу измерения сопротивления

$$\frac{1\ в}{1\ а} = 1\ \frac{в}{а} = 1\ ом.$$

Единицей сопротивления является о м.

Сопротивление в 1 *ом*, это сопротивление проводника, в котором проходит ток 1*а* при напряжении на его зажимах в 1 *в*.

Условное обозначение сопротивления, применяемое на схемах, дано в табл. 1-1.

Величина, обратная сопротивлению,

$$g = \frac{1}{r} = \frac{\gamma S}{l} = \frac{I}{U} \qquad (1\text{-}15)$$

называется электрической проводимостью (электропроводностью). Она характеризует способность проводника проводить электрический ток под действием электрического поля.

Единица проводимости — величина, обратная 1 *ом*, т. е. $\frac{1}{ом}$, она называется сименс (*сим*).

Величина, обратная удельной проводимости,

$$\rho = \frac{1}{\gamma} \qquad (1\text{-}16)$$

называется удельным сопротивлением.

Таким образом, сопротивление может быть выражено

$$r = \frac{l}{\gamma S} = \rho \frac{l}{S}, \qquad (1\text{-}17)$$

а удельное сопротивление

$$\rho = \frac{rS}{l}. \qquad (1\text{-}18)$$

Удельное сопротивление как величина, обратная удельной проводимости, зависит от тех же величин, что и удельная проводимость (§ 1-5), т. е. от свойств материала провода и его температуры, а сопротивление провода, кроме того, от длины и сечения провода.

Сопротивление провода обычно измеряется в омах, сечение в квадратных миллиметрах, а длина в метрах, следовательно, согласно (1-18) удельное сопротивление будет измеряться в *ом* · *мм*^{2}/*м*, а удельная проводимость, как величина, обратная удельному сопротивлению, в *м*/*ом* · *мм*^{2}.

Значения удельных сопротивлений и проводимостей ряда материалов даны в табл. 1-2.

Следует обратить внимание на то, что термин сопротивление применяется в двух значениях:

1. Сопротивление, как следует из § 1-5 и 1-6, это один из параметров провода, участка цепи или приемника, которым характеризуется одно из их электрических свойств. В этом смысле можно сказать: приемник энергии обладает сопротивлением в 30 *ом* или провод имеет сопротивление 0,1 *ом*.

2. Сопротивлением называют устройство, обладающее указанным параметром, предназначенное для включения в

электрическую цепь с целью ограничения или уменьшения тока цепи.

Таблица 1-2

Характеристики некоторых электротехнических материалов

Матсриал	Плотность, $г/см^3$	Температура плавления, °С	Предел прочности на разрыв, $кГ/мм^2$	Удельное электрическое сопротивление при 20° С, $ом \cdot мм^2/м$	Среднее значение температурного коэффициента сопротивления (от 0 до 100 °С), $1/град$
Алюминий .	2,7	657	14—22	0,029	0,004
Бронза . . .	8,8—8,9	900	50—60	0,021—0,4	0,004
Вольфрам .	18,7	3 370	415	0,056	0,00464
Константан	8,8	1 200	40	0,4—0,51	0,000005
Латунь . . .	8,1	900	40	0,07—0,08	0,002
Манганин .	8,1	960	55	0,42	0,000006
Медь	8,8	1 083	25—40	0,0175	0,004
Нихром. . .	8,2	1 360	70	1,1	0,00015
Сталь	7,8	1 400	80—150	0,13—0,25	0,006
Фехраль . .	7,6	1 450	—	1,4	0,00028
Хромаль . .	7,1	1 500	80	1,3	0,00004

Переменное сопротивление — р е о с т а т — предназначено для регулирования тока в цепи.

Сопротивления бывают проволочные и непроволочные.

Реостаты бывают проволочные, жидкостные и непроволочные. Проволочные реостаты делятся на реостаты с плавной и ступенчатой регулировкой.

Проволочный реостат с плавной регулировкой представляет собой проволочную спираль, наложенную на каркас из изоляционного материала. Включенное в электрическую цепь сопротивление реостата между одним концом спирали и движком можно изменять, перемещая движок.

Пример 1-1. В сеть с напряжением $U = 110$ *в* включена лампа накаливания с сопротивлением $r = 220$ *ом*. Определить силу тока в лампе.

Сила тока

$$I = \frac{U}{r} = \frac{110}{220} = 0{,}5 \ а.$$

Пример 1-2. Определить напряжение на зажимах нагревательного прибора, если сила тока в нем $I = 5$ *а*, а сопротивление его $r = 45$ *ом*.

Напряжение на зажимах

$$U = Ir = 5 \cdot 45 = 225 \ в.$$

1-7. ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Повышение температуры металлического проводника вызывает увеличение числа столкновений свободных электронов с атомами, вследствие чего уменьшается средняя скорость направленного движения электронов, что соответствует увеличению сопротивления. Таким образом, изменение сопротивления проводника от температуры зависит от строения материала проводника.

Относительное приращение сопротивления многих металлических проводников при изменении температуры в пределах 100° С пропорционально изменению температуры.

Таким образом,

$$\frac{\Delta r}{r_1} = \frac{r_2 - r_1}{r_1} = \alpha(\theta_2 - \theta_1), \tag{1-19}$$

откуда

$$r_2 = r_1 + r_1\alpha(\theta_2 - \theta_1),$$

или окончательно

$$r_2 = r_1[1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)], \tag{1-20}$$

где r_1 и r_2 — сопротивления при температурах θ_1 и θ_2;

α — температурный коэффициент сопротивления — относительное изменение сопротивления при повышении температуры на 1° С.

Температурный коэффициент меди $\alpha = 0{,}004$ $1/град$. Это обозначает, что при изменении температуры медного провода на 1° С сопротивление его изменится на 0,4%.

Значения температурного коэффициента даны в табл. 1-2.

Формулу (1-19) можно использовать для измерения температуры θ_2 провода (обмотки машины), для чего при известных r_1, α и θ_1 следует измерить сопротивление r_2 и искомую температуру найти по формуле

$$\theta_2 = \frac{r_2 - r_1}{\alpha r_1} + \theta_1. \tag{1-21}$$

Формула (1-21) получена путем несложных преобразований из формулы (1-19).

Пример 1-3. Определить сопротивление проводов воздушной линии при температурах +20 и —10° С, если сечение медных проводов $S = 10$ $мм^2$, длина линии 200 $м$.

Сопротивление двух проводов линии при температуре + 20° С:

$$r_1 = \rho \frac{l}{S} = 0{,}0175 \frac{2 \cdot 200}{10} = 0{,}7 \text{ ом}.$$

Сопротивление тех же проводов при температуре — 10° С:

$$r_2 = r_1 [1 + \alpha (\theta_2 - \theta_1)] = 0{,}7 [1 + 0{,}004 (-30)] = 0{,}616 \text{ ом}.$$

Пример 1-4. При температуре $\theta_1 = 20°$ С сопротивление медной обмотки электродвигателя $r_1 = 2{,}24$ *ом*. После двух часов работы электродвигателя сопротивление той же обмотки $r_2 = 2{,}8$ *ом*. Определить температуру обмотки электродвигателя после двух часов работы

$$\theta_2 = \frac{r_2 - r_1}{\alpha r_1} + \theta_1 = \frac{2{,}8 - 2{,}4}{0{,}004 \cdot 2{,}4} + 20 \approx 62° \text{ С}.$$

1-8. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ

Атомы химических элементов, входящих в состав любого вещества, состоят из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов, движущихся вокруг ядра.

Атомы обычно электрически нейтральны, так как заряд ядра равен сумме зарядов электронов.

Если от электрически нейтрального атома (молекулы) отделяется электрон, то атом превращается в положительный ион. Отделившийся от атома электрон может присоединиться к другому нейтральному атому, образуя отрицательный ион, или он может остаться свободным. Такие электроны называют *электронами проводимости*, а процесс образования ионов — *ионизацией*. Количество свободных электронов или ионов в единице объема определяет концентрацию свободно заряженных частиц.

Каждый электрон в атоме может обладать только определенными значениями энергии, т. е. находиться только в разрешенных энергетических состояниях или уровнях, так как изменение энергии электрона может происходить только определенными порциями — квантами. Переход электрона на более высокий уровень требует затраты энергии. Переход электрона на более низкий уровень сопровождается излучением избытка энергии атомом.

В веществах, образованных совокупностью атомов, вследствие взаимного влияния соседних атомов энергетические уровни несколько изменяются, образуя энергетические зоны. Эти зоны отделяются областями, в которых электроны не могут находиться, называемыми *запрещен-*

ными зонами. Энергетические зоны, соответствующие разрешенным уровням, делятся на заполненную и свободную.

Для возникновения электропроводности необходимо части электронов заполненной зоны перейти в свободную зону. Возможность такого перехода определяется шириной запрещенной зоны, пропорциональной энергии, которую необходимо затратить для указанного перехода электронов.

Различие электропроводности проводников, полупроводников и диэлектриков вызывается особенностями их строения. Согласно зонной теории твердого тела у металлических

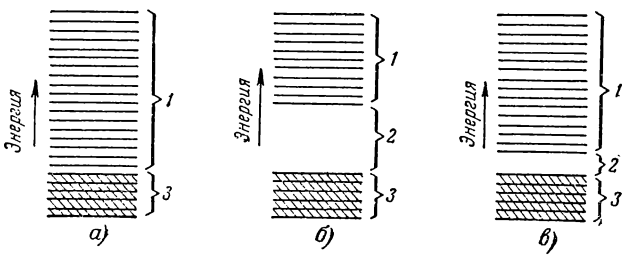


Рис. 1-5. Энергетические уровни.

а — проводник; *б* — диэлектрик; *в* — полупроводник: *1* — свободная зона; *2* — запрещенная зона; *3* — заполненная зона.

проводников высокая электропроводность обусловливается тем, что заполненная зона вплотную прилегает к свободной зоне (рис. 1-5, *а*).

Вследствие этого электроны в металле могут переходить с уровней заполненной зоны на уровни свободной зоны. Иначе говоря, электроны могут с менее удаленных от ядра орбит переходить на более удаленные орбиты или покидать пределы атома, становясь свободными, перемещаясь от одного атома к другому под действием слабых напряженностей электрического поля, созданного напряжением, приложенным к концам проводника.

Если у данного вещества свободная зона отделена от заполненной достаточно широкой запрещенной зоной (рис. 1-5, *б*), то соответственно этому электропроводность вещества будет ничтожной и, следовательно, это будет диэлектрик.

У полупроводников ширина запрещенной зоны значительно у́же, чем у диэлектриков (рис. 1-5, *в*); в соответствии

с чем для перехода электронов в свободную зону требуется небольшое возбуждение, например за счет усиления теплового движения атомов при повышении температуры, в связи с чем они обладают электропроводностью, имеющей промежуточное значение между проводниками и диэлектриками.

Проводники делятся на два рода. В проводниках первого рода, к которым преимущественно относятся металлы и их сплавы, электрический ток создается перемещением только электронов (проводники с электронной проводимостью).

В проводниках второго рода — электролитах, к которым относятся водные растворы кислот и солей, электрический ток создается перемещением отрицательных и положительных ионов, которые получаются вследствие распада молекул вещества под действием растворителя (проводники с ионной проводимостью).

1-9. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Проводниковые материалы, применяемые в электротехнике, можно разделить на две группы. К первой группе относятся материалы с высокой удельной проводимостью, ко второй — материалы с высоким удельным сопротивлением.

Материалы первой группы должны иметь: большую удельную проводимость, малый температурный коэффициент сопротивления, достаточную механическую прочность и устойчивость в отношении коррозии.

В зависимости от назначения материала к одним из перечисленных свойств предъявляются повышенные требования, к другим, наоборот, пониженные. Так, например, для обмоток электрических машин механическая прочность может быть допущена более низкой, чем для контактных проводов, работающих на разрыв и истирание.

Чистые металлы обладают наибольшей проводимостью, так как любые примеси снижают проводимость.

Медь. Медь получила наиболее широкое распространение как проводниковый материал вследствие небольшого удельного сопротивления ($\rho = 0{,}0175$ *ом* · *мм*^{2}/*м*), достаточной механической прочности, хорошей обрабатываемости и достаточной стойкости к коррозии.

Прокаткой или волочением из меди можно получить проволоку, шины, полосы, например клиновидного сечения для коллекторных пластин и т. д.

Обычно применяется электролитическая медь, содержащая примесей не более 0,1%. Различают твердую, неотожженную медь марки МТ и мягкую, отожженную медь марки ММ.

Твердая медь применяется, например, для контактных проводов (электрическая тяга), коллекторных пластин (электрические машины) и т. д. Мягкая медь широко применяется для обмоточных проводов, из которых изготовляются обмотки электрических машин, и различных электромагнитных аппаратов и приборов.

Кроме чистой меди, применяются ее сплавы с другими металлами — б р о н з ы, л а т у н ь.

Все бронзы имеют повышенную механическую прочность и повышенное удельное сопротивление.

Кадмиевая бронза (Cd — 0,9%) применяется для коллекторных пластин и троллейных проводов.

Бериллиевая бронза (Bl — 2,2%) применяется для токоведущих пружин, скользящих контактов, щеткодержателей.

Латунь (Zn — 30%) широко применяется для изготовления деталей в электроаппарато- и приборостроении.

А л ю м и н и й. По применению он занимает второе место, уступая первое место меди, так как обладает худшими электрическими ($\rho = 0{,}0295$ *ом* · *мм*^{2}/*м*) и механическими свойствами. Чистый алюминий — мягкий, обладает малой механической прочностью. По твердости различают мягкий алюминий, отожженный, марки АМ и твердый, неотожженный, марки АТ.

При применении алюминиевых проводов, взамен медных, при одинаковом сопротивлении и одинаковой длине алюминиевые провода будут иметь сечение на 60% больше медных, а вес будет составлять 48% медных.

Для проводов линий электропередач применяются алюминиевые сплавы, например алдрей, содержащий 1—1,5% Mg, Si, Fe, обладающий достаточной механической прочностью и хорошей проводимостью ($\rho = 0{,}032$ *ом* · *мм*^{2}/*м*).

Применяются также сталеалюминиевые провода, у которых поверх внутренних стальных проволок расположены наружные алюминиевые.

С т а л ь (железо) обладает значительным удельным сопротивлением ($\rho = 0{,}13$ *ом* · *мм*^{2}/*м*) и малой стойкостью по

отношению к коррозии. Поэтому сталь применяется для проводов воздушных линий только при передаче малой мощности, так как в этом случае сечение проводов определяется не электрическим сопротивлением, а их механической прочностью. Для защиты от коррозии применяется цинковое или медное покрытие (оцинкованные или обмедненные провода).

Ко второй группе проводниковых материалов относятся материалы с высоким удельным сопротивлением. Это преимущественно сплавы: никель—хром—железо (нихром); железо—хром—алюминий (фехраль) и др. Они применяются для изготовления обмоток нагревательных приборов, аппаратов, реостатов. Они выдерживают высокие температуры нагрева (порядка 1 000° С). Высокое удельное сопротивление их обеспечивает возможность получения коротких и компактных обмоток.

Манганин — сплав меди 86%, марганца 12% и никеля 2%. Он обладает высоким удельным сопротивлением и малым температурным коэффициентом (порядка $1 \cdot 10^{-5}$ 1/*град*), вследствие чего применяется для изготовления шунтов, добавочных сопротивлений и образцовых катушек сопротивлений.

Припой и флюсы. Припой это сплав для пайки, которая применяется для получения электрического соединения с малым сопротивлением.

Припой должен иметь температуру плавления значительно более низкую, чем металл соединяемых деталей (проводов), для того чтобы при нагревании он плавился, а металл соединяемых деталей оставался твердым. Припой покрывает поверхность соединяемых деталей и заполняет зазоры между ними. Припой диффундирует в металл деталей, в результате промежуточный слой и соединяемые детали после остывания образуют одно целое.

Применяются мягкие оловянно-свинцовые припои, содержащие олова от 18 до 90%, и твердые медно-цинковые с содержанием меди от 36 до 55%.

Для пайки алюминиевых проводов применяют цинко-оловяннистый припой, содержащий цинка 56%, олова 42% и меди 2%, или цинко-алюминиевый, содержащий цинка 80%, алюминия 12% и меди 8%.

Для получения прочного и надежного соединения припоя с материалом соединяемых деталей применяют вспомогательные вещества — флюсы. Основное назначение их

растворить и удалить окислы и загрязнения с поверхностей спаиваемых участков.

В качестве флюсов применяется преимущественно канифоль.

При пайке алюминиевых проводов применяется флюс, состоящий из 100 весовых частей денатурированного спирта и 20 весовых частей канифоли.

Электротехнический уголь. Основой электротехнического угля являются разновидности углерода — графит и уголь. Они размельчаются и вместе с добавочными компонентами, например медным порошком, связываются при помощи каменноугольных пеков и смол, формируются и подвергаются термической обработке.

Электротехнический уголь применяется для изготовления щеток к электрическим машинам, угольных электродов для печей, сварки, электрических ванн, непроволочных сопротивлений, деталей электровакуумных приборов, гальванических элементов и т. д.

1-10. РАБОТА И МОЩНОСТЬ

В замкнутой электрической цепи (рис. 1-3), состоящей из источника питания и приемника энергии, под действием э. д. с. источника происходит беспрерывное разделение зарядов.

Из изложенного выше (§ 1-2) следует, что работа, затраченная внешними силами за время t на перемещение электрического заряда q в источнике питания, или электрическая энергия, полученная за счет преобразования какого-либо другого вида энергии,

$$A_{\text{и}} = W_{\text{и}} = Eq = EIt. \qquad (1\text{-}22)$$

Согласно закону сохранения энергии полученная электрическая энергия за то же время преобразуется в другие виды энергии во всех участках цепи, т. е. в нашем случае в приемнике энергии и источнике питания (преобразованием энергии в проводах пренебрегаем).

Работа $A_{\text{П}}$, совершаемая при перемещении заряда в приемнике, или равная ей энергия $W_{\text{П}}$, преобразуемая в другой вид энергии в приемнике,

$$A_{\text{П}} = W_{\text{П}} = U_{\text{П}}q = U_{\text{П}}It; \qquad (1\text{-}23)$$

здесь $U_{\text{П}}$ — напряжение на приемнике.

Разность энергии

$$W_{\text{и}} - W_{\text{п}} = W_0$$

представляет собой энергию, преобразуемую в тепло в источнике питания.

Эта энергия согласно (1-22) и (1-23) может быть выражена

$$(E - U_{\text{п}})\, It = W_0 = U_0 It,$$

откуда

$$U_0 = E - U_{\text{п}}$$

представляет внутреннее падение напряжения, о котором было уже сказано в § 1-4.

Отношение совершенной работы к времени, в течение которого она выполнена,

$$P = \frac{A}{t} \tag{1-24}$$

называется мощностью. Таким образом, мощность — это скорость, с которой происходит преобразование энергии.

Скорость, с которой какая-либо энергия преобразуется в электрическую в источнике питания, называется мощностью источника (генератора):

$$P_{\text{и}} = \frac{EIt}{t} = EI. \tag{1-25}$$

Скорость, с которой электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии в приемнике, называется мощностью приемника или потребителя:

$$P_{\text{п}} = \frac{U_{\text{п}} It}{t} = U_{\text{п}} I. \tag{1-26}$$

Скорость непроизводительного расхода электрической энергии внутри источника питания называется мощностью потерь:

$$P_0 = U_0 I. \tag{1-27}$$

В согласии с законом сохранения энергии мощность источника питания (генератора) равна сумме мощностей приемника и мощности потерь в генераторе; таким образом,

$$P_{\text{и}} = P_{\text{п}} + P_0. \tag{1-28}$$

В международной системе единиц (СИ) единицей мощности служит ватт (*вт*) — мощность, при которой в каж-

дую секунду совершается работа, равная 1 *дж*, или мощность, при которой в каждую секунду 1 *дж* электрической энергии преобразуется в другой вид; таким образом,

$$1\ вт = \frac{1\ дж}{1\ сек},$$

откуда

$$1\ дж = 1\ вт \cdot 1\ сек = 1\ вт \cdot сек;$$

следовательно, 1 джоуль равен 1 ватт-секунде.

Из § 1-2 известно, что

$$1\ дж = 1\ в \cdot 1\ к;$$

таким образом,

$$1\ вт = \frac{1\ дж}{1\ сек} = \frac{1\ в \cdot 1\ к}{1\ сек} = 1\ в \cdot 1\ а;$$

следовательно, 1 *вт* — это мощность, развиваемая током в 1 *а* при напряженности в 1 *в*.

Пример 1-5. В сеть с напряжением $U = 220$ *в* включен электродвигатель мощностью $P = 5$ *квт*. Определить силу тока электродвигателя.

Согласно (1-26):

$$P = UI,$$

откуда

$$I = \frac{P}{U} = \frac{5\,000}{220} \approx 23\ а.$$

Пример 1-6. В сеть с напряжением $U = 225$ *в* включен нагревательный прибор, сила тока которого $I = 4$ *а*. Определить мощность прибора и стоимость энергии, израсходованной прибором в течение 2 *ч*. Стоимость 1 *квт · ч* электрической энергии составляет 4 коп.

Мощность прибора $P = UI = 225 \cdot 4 = 900$ *вт*.

Энергия, израсходованная прибором за 2 *ч* работы:

$$W = Pt = 900 \cdot 2 = 1\,800\ вт \cdot ч = 1{,}8\ квт \cdot ч.$$

Стоимость израсходованной энергии

$$4 \cdot 1{,}8 = 7{,}2\ коп.$$

1-11. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВУЮ

Электрический ток представляет собой направленное движение электрических частиц. При столкновении движущихся частиц с ионами или молекулами вещества кинетическая энергия движущихся частиц частично передается ионам или молекулам, вследствие чего происходит нагревание проводника. Таким образом, электрическая энергия

преобразуется в тепловую, которая тратится на нагрев провода и рассеивается в окружающую среду.

Скорость преобразования электрической энергии в тепловую определяется мощностью (1-26):

$$P = UI$$

или, учитывая, что $U = Ir$, получаем:

$$\boldsymbol{P = UI = I^2r.} \qquad (1\text{-}29)$$

Электрическая энергия, переходящая в тепловую,

$$W = Pt = I^2rt.$$

Так как 1 *дж* = 0,24 калории, то выделенное в сопротивлении тепло

$$\boldsymbol{Q = 0{,}24\, I^2rt.} \qquad (1\text{-}30)$$

Полученное выражение, определяющее соотношение между количеством выделенного тепла, силой тока, сопротивлением и временем, было найдено в 1844 г. опытным путем русским академиком Э. Х. Ленцем и одновременно английским ученым Джоулем. Оно известно теперь под названием закона Джоуля—Ленца: количество тепла, выделенного током в проводнике, пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока.

Э. Х. Ленц (1804—1865).

Преобразование электрической энергии в тепло находит полезное применение в разнообразных нагревательных и осветительных приборах и устройствах.

В остальных приборах и устройствах преобразование электрической энергии в тепловую является непроизводительным расходом энергии (потерями), снижающим к. п. д. их. Кроме того, тепло, вызывая нагревание этих устройств,

ограничивает их нагрузку, а при перегрузке повышение температуры может повести к повреждению изоляции или сокращению срока работы установки.

Пример 1-7. Определить количество тепла, выделенное в нагревательном приборе в течение 15 *мин*, если сопротивление прибора 22 *ом*, а напряжение сети 110 *в*.

Сила тока

$$I = \frac{U}{r} = \frac{110}{22} = 5a.$$

Количество тепла, выделенное в приборе,

$$Q = 0{,}24\, I^2rt = 0{,}24 \cdot 5^2 \cdot 22 \cdot 15 \cdot 60 = 118\,800 \text{ кал}.$$

1-12. ДОПУСТИМЫЙ ТОК В ПРОВОДЕ. ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕГРУЗКИ

При нагревании провода приращение его температуры зависит от массы провода и количества выделившегося в нем тепла. Скорость отдачи тепла в окружающую среду пропорциональна разности температур провода и среды. В начале нагревания током температуры провода и среды одинаковы, следовательно, в окружающую среду тепло почти не отдается, практически все тепло идет на нагревание провода, температура провода быстро растет. С ростом температуры провода увеличивается разность температур провода и среды, отдача тепла проводом и рост температуры провода замедляется. При некоторой температуре устанавливается равновесие между выделяемым током, теплом и отдаваемым проводом теплом в окружающую среду. Температура провода достигает *установившегося* значения. Время нагревания до установившейся температуры неодинаково для различных устройств: от долей секунды для нити лампы накаливания до нескольких часов для машин значительной мощности.

Нагрев проводов допускается до определенных значений. У изолированных проводов он определяется родом и свойством изоляции, у голых неизолированных проводов — изменением механических свойств. Ток, при котором нагревание достигает допустимой температуры, называется *допустимым током провода*. Значение допустимых токов для некоторых сечений медных изолированных проводов дано в табл. 1-3.

Отдельные участки электрической цепи защищаются от теплового действия токов перегрузки (выше допустимой) и токов короткого замыкания *плавкими пре до-*

хранителями (§ 14-11) или реле (§ 14-14). Основной частью предохранителя является вставка, имеющая короткий кусок проволоки из легкоплавкого металла, который нагревается током перегрузки и, расплавляясь, разрывает цепь, отключая защищаемый участок.

Таблица 1-3

Допустимые токовые нагрузки для изолированных проводов

Поперечное сечение медного провода, *мм*²	0,5	0,75	1,0	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50
Предельно допустимый ток, *а*	11	15	17	23	30	41	50	80	100	140	170	215

Коротким замыканием называется непосредственное соединение двух проводов (зажимов) разного потенциала или соединение их через ничтожно малое сопротивление. Ток короткого замыкания в десятки раз превышает допускаемый ток и может вызвать механические и тепловые повреждения или разрушения отдельных частей установки.

1-13. ПЕРВОЕ ПРАВИЛО КИРХГОФА

Точка электрической цепи называется узлом или точкой разветвления, если в ней соединяются несколько проводов. Сумма токов, направленных к точке разветвления, равна сумме токов, направленных от нее. Это первое правило Кирхгофа.

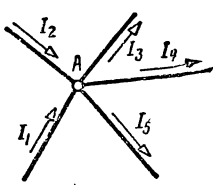


Рис. 1-6. Узел электрической цепи.

Например, для узла A (рис. 1-6) напишем:

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$$

или, перенеся токи в одну часть равенства, получим:

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 - I_5 = 0.$$

В общем виде запишем:

$$\Sigma I = 0, \qquad (1\text{-}31)$$

т. е. алгебраическая сумма токов в узле равна нулю. В последних двух выражениях токи, направленные к узлу, считаются положительными, а токи, направленные от узла, отрицательными.

1-14. СОЕДИНЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ЭНЕРГИИ (СОПРОТИВЛЕНИЙ)

а) *Последовательное соединение*

Если несколько приемников или сопротивлений соединены, как показано на рис. 1-7, одно за другим, без разветвлений и присоединены к источнику тока, то по ним будет проходить один и тот же ток; такое соединение называется последовательным соединением.

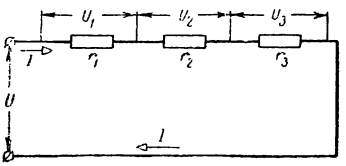


Рис. 1-7. Последовательное соединение сопротивлений.

Напряжения на сопротивлениях (1-9):

$$U_1 = Ir_1; \quad U_2 = Ir_2; \quad U_3 = Ir_3.$$

Так как сила тока на всех участках цепи одинакова, то напряжения на этих участках пропорциональны их сопротивлениям, т. е.

$$U_1 : U_2 = r_1 : r_2 \quad \text{и} \quad U_2 : U_3 = r_2 : r_3. \tag{1-32}$$

Мощности, развиваемые на отдельных участках:

$$P_1 = U_1 I; \quad P_2 = U_2 I; \quad P_3 = U_3 I.$$

По закону сохранения энергии мощность всей цепи равна сумме мощностей участков, следовательно:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = I(U_1 + U_2 + U_3) = IU.$$

Следовательно, напряжение на зажимах цепи равно сумме напряжений на участках цепи

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \tag{1-33}$$

Разделив почленно последнее выражение на ток, получим:

$$\frac{U}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} + \frac{U_3}{I},$$

или

$$r = r_1 + r_2 + r_3. \tag{1-34}$$

Сопротивление r принято называть общим (или эквивалентным) сопротивлением цепи, т. е. таким, заменяя которым все сопротивления при том же напряжении, получим ту же силу тока в цепи.

Таким образом, общее сопротивление цепи, состоящей из последовательно соединенных участков, равно сумме всех сопротивлений. Примером последовательного соединения могут служить: провода и присоединенный на конце их приемник энергии; при напряжении в трамвайной сети $U_с = 600$ *в* и номинальном напряжении лампы накаливания $U_л = 120$ *в* они соединяются последовательно по пять ламп ($U_с : U_л = 600 \ в : 120 \ в = 5$).

Пример 1-8. Определить, в каких пределах можно регулировать силу тока в цепи с напряжением $U = 220$ *в*, в которой соединены последовательно обмотка возбуждения электродвигателя с сопротивлением $r_1 = 44$ *ом* и реостат, сопротивление которого r_2 можно изменять от 0 до 176 *ом*.

Общее сопротивление цепи

$$r = r_1 + r_2.$$

При $r_2 = 0$ сила тока в цепи

$$I = \frac{U}{r_1 + r_2} = \frac{220}{44 + 0} = 5 \ а.$$

При $r_2 = 176$ *ом* сила тока в цепи

$$I = \frac{U}{r_1 + r_2} = \frac{220}{44 + 176} = 1 \ а.$$

б) Параллельное соединение

Параллельным соединением сопротивлений называется соединение (рис. 1-8), при котором к двум точкам электрической цепи присоединено несколько сопротивлений, образующих разветвление, состоящее из параллельных ветвей. Таким образом, при параллельном соединении один зажим каждого сопротивления присоединен к одному узлу, а другой зажим каждого сопротивления к другому узлу.

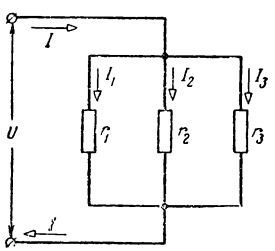


Рис. 1-8. Параллельное соединение сопротивлений.

Так как напряжение на каждом из сопротивлений равно напряже-

нию U между узлами, то напряжения на сопротивлениях ветвей одинаковы, т. е.

$$U = U_1 = U_2 = U_3, \tag{1-35}$$

или, выражая напряжения через произведение соответствующих токов и сопротивлений, можно написать:

$$U = I_1 r_1 = I_2 r_2 = I_3 r_3,$$

откуда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2}{r_1} \quad \text{и} \quad \frac{I_2}{I_3} = \frac{r_3}{r_2}, \tag{1-36}$$

т. е. токи в ветвях распределяются обратно пропорционально сопротивлениям ветвей.

Согласно первому правилу Кирхгофа

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

или, выражая токи через отношения напряжения к соответствующим сопротивлениям, получим:

$$\frac{U}{r} = \frac{U_1}{r_1} + \frac{U_2}{r_2} + \frac{U_3}{r_3},$$

откуда после сокращения

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \tag{1-37}$$

или

$$g = g_1 + g_2 + g_3.$$

Сопротивление r принято называть общим или эквивалентным сопротивлением цепи, а g — общей или эквивалентной проводимостью цепи.

Из формулы (1-37) следует, что при параллельном соединении сопротивлений эквивалентная проводимость цепи равна сумме проводимостей отдельных ветвей.

Формула (1-37) дает возможность определить эквивалентное сопротивление разветвленной цепи. Например, при трех ветвях, приведя к общему знаменателю правую часть уравнения (1-37), получим:

$$\frac{1}{r} = \frac{r_1 r_2 + r_1 r_3 + r_2 r_3}{r_1 r_2 r_3},$$

откуда эквивалентное сопротивление цепи

$$r = \frac{r_1 r_2 r_3}{r_1 r_2 + r_1 r_3 + r_2 r_3}. \qquad (1\text{-}38)$$

Если сопротивления ветвей равны, то

$$r = \frac{r_1^3}{3r_1^2} = \frac{r_1}{3}.$$

Если разветвление имеет n параллельных ветвей с одинаковыми сопротивлениями r_1, то эквивалентное сопротивление разветвления

$$r = \frac{r_1}{n}. \qquad (1\text{-}39)$$

Эквивалентное сопротивление разветвления, состоящего из двух параллельных ветвей согласно уравнению (1-37), определяется по формуле

$$r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}. \qquad (1\text{-}40)$$

Большинство приемников энергии, в том числе лампы накаливания, нагревательные приборы, двигатели, предназначены для работы при неизменном номинальном напряжении. Поэтому они в большинстве случаев соединяются параллельно, так как при этом способе соединения все они находятся под одним и тем же номинальным напряжением и режим работы каждого из них практически не зависит от режима работы остальных.

Пример 1-9. К линии с напряжением $U = 115$ *в* подключены электродвигатель мощностью $P_1 = 3{,}5$ *квт* и электропечь мощностью $P_2 = 2{,}3$ *квт*. Определить силу тока в линии.

Сила тока в двигателе

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{3\,500}{115} \approx 30 \text{ а}.$$

Сила тока в электропечи

$$I_2 = \frac{P_2}{U} = \frac{2\,300}{115} = 20 \text{ а},$$

Сила тока в линии

$$I = I_1 + I_2 = 30 + 20 = 50 \text{а}.$$

Пример 1-10. Определить сопротивление лампы накаливания мощностью $P_л = 100$ *вт* и напряжением $U = 220$ *в*. Определить сопротивление двадцати параллельно включенных таких ламп.

Так как мощность $P = UI = U^2/r$,
то сопротивление лампы накаливания

$$r_л = \frac{U^2}{P_л} = \frac{220^2}{100} = 484 \text{ ом}.$$

Общее сопротивление двадцати параллельно соединенных ламп

$$r = \frac{r_л}{20} = \frac{484}{20} = 24{,}2 \text{ ом}.$$

в) *Смешанное соединение*

Смешанным соединением называется последовательно-параллельное соединение сопротивлений или участков цепи, каждый из которых может состоять из последовательно или параллельно соединенных сопротивлений.

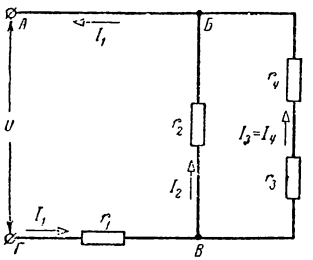


Рис. 1-9. Смешанное соединение сопротивлений.

Примером смешанного соединения может служить цепь, изображенная на рис. 1-9. Цепь состоит из двух последовательно соединенных участков: участка $БВ$, имеющего две параллельные ветви (r_2 и $r_3 + r_4$), и участка $ВГ$, состоящего из сопротивления r_1.

Сопротивление разветвленного участка определяется по формуле (1-40):

$$r_{БВ} = \frac{r_2 (r_3 + r_4)}{r_2 + (r_3 + r_4)}.$$

Эквивалентное сопротивление цепи

$$r = r_1 + r_{БВ} = r_1 + \frac{r_2 (r_3 + r_4)}{r_2 + (r_3 + r_4)}.$$

Пример 1-11. Определить токи во всех участках цепи на рис. 1-9 и напряжения на тех же участках. Напряжение на зажимах цепи $U_{АГ} = 210$ *в*. Сопротивления $r_1 = 0{,}6$ *ом*; $r_2 = 4$ *ом*; $r_3 = 3{,}5$ *ом*; $r_4 = 2{,}5$ *ом*.

Общее сопротивление цепи

$$r = r_1 + \frac{r_2 (r_3 + r_4)}{r_2 + r_3 + r_4} = 0{,}6 + \frac{4 (3{,}5 + 2{,}5)}{4 + 3{,}5 + 2{,}5} = 3 \text{ ом}.$$

Ток в первом сопротивлении

$$I_1 = \frac{U_{АГ}}{r} = \frac{210}{3} = 70 \text{ а}.$$

Напряжение на первом сопротивлении

$$U_1 = I_1 r_1 = 70 \cdot 0{,}6 = 42 \text{ в}.$$

Напряжение на разветвленной части цепи

$$U_{БВ} = U_{АГ} - U_1 = 210 - 42 = 168 \text{ в}.$$

Ток

$$I_2 = \frac{U_{БВ}}{r_2} = \frac{168}{4} = 42 \text{ а}.$$

Ток

$$I_3 = \frac{U_{БВ}}{r_3 + r_4} = \frac{168}{3{,}5 + 2{,}5} = 28 \text{ а}.$$

1-15. ДВУХПРОВОДНАЯ ЛИНИЯ

Электрическая энергия от генератора к потребителю передается по проводам. Устройство, состоящее из прямого и обратного проводов, изоляторов и опор, несущих эти изоляторы и провода, называется электрической линией (рис. 1-10).

При малой длине проводов сопротивлением их можно пренебречь. При большей длине их (десятки метров и более) сопротивлением проводов пренебрегать нельзя, так как при прохождении тока I в них будет падение напряжения

$$\Delta U = Ir = I\frac{2l}{\gamma S}, \quad (1\text{-}41)$$

где $2l$ — длина прямого и обратного проводов линии.

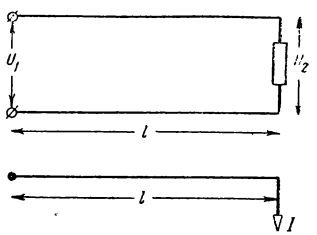


Рис. 1-10. Двухпроводная линия с нагрузкой на конце.

Разность напряжений в начале и конце линии $U_1 - U_2$, равная падению напряжения в линии, называется потерей напряжения, т. е.

$$U_1 - U_2 = \Delta U = Ir. \quad (1\text{-}42)$$

При изменении нагрузки (тока) от нуля до номинальной пропорционально току изменяется и потеря напряжения. При неизменном напряжении в начале линии напряжение в конце линии, равное напряжению на приемнике, будет изменяться от $U_2' = U_1$ при $I = 0$ до $U_2'' = U_1 - \Delta U$ при нагрузке.

Таким образом, допускаемая потеря напряжения равна допускаемому колебанию напряжения на приемниках,

которое для ламп накаливания составляет 1—2%, а для электродвигателей — 2—5% от номинального напряжения.

Если допускаемая потеря напряжения задана, то, воспользовавшись формулой (1-41), можно определить необходимое сечение проводов линии

$$S = \frac{2Il}{\gamma \Delta U}. \qquad (1\text{-}43)$$

Найденное по допускаемой потере напряжения сечение должно быть проверено на допускаемый ток, определяемый нагревом провода (табл. 1-3).

Умножив потерю напряжения в проводах на ток, получим мощность потерь в линии:

$$\Delta P = I \Delta U = I^2 r.$$

Коэффициент полезного действия линии

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta U}{U_1}.$$

Таким образом, с увеличением нагрузки (тока) к. п. д. уменьшается.

При допускаемых потерях напряжения 2—5% к. п. д. будет составлять 98—95%.

Пример 1-12. Выбрать сечение проводов для линии длиной $l = 70$ *м*, на конце которой имеется нагрузка — двигатель с номинальной силой тока $I = 45$ *а*. Напряжение 110 *в*. Допустимая потеря напряжения 5%. Провода медные, $\gamma = 57$ *м/ом · мм*^{2}.

Сечение проводов определяем по формуле (1-43):

$$S = \frac{2Il}{\gamma \Delta U} = \frac{2 \cdot 45 \cdot 70}{57 \cdot 110 \cdot 0{,}05} \approx 20 \text{ мм}^2.$$

Выбираем ближайшее стандартное сечение $S' = 25$ *мм*^{2}.

Проверяем выбранное сечение проводов по допустимому нагреванию (§ 1-12). Согласно табл. 1-3 сечение $S' = 25$ *мм*^{2} допускает нагрузку током до 125 *а*, так что заданный ток в 45 *а* допустим.

1-16. ДВА РЕЖИМА РАБОТЫ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Ток в цепи (рис. 1-11) с двумя источниками питания можно определить, пользуясь методом наложения. В этом случае ток в каждом участке цепи определяют как алгебраическую сумму токов, создаваемых каждым из источников, действующих независимо друг от друга при неизменных сопротивлениях цепи.

При наличии в цепи одного первого источника ток в цепи

$$I_1 = \frac{E_1}{r_{01} + r_{02} + r}.$$

Он совпадает по направлению с э. д. с. E_1.

При наличии в цепи одного второго источника ток в цепи

$$I_2 = \frac{E_2}{r_{01} + r_{02} + r}.$$

Направление его совпадает с направлением э. д. с. E_2.

Действительный ток в цепи при одновременном действии двух источников и одинаковом направлении их э. д. с.

$$I = I_1 + I_2 = \frac{E_1 + E_2}{r_{01} + r_{02} + r}. \quad (1\text{-}44)$$

Если э. д. с. источников направлены встречно, то ток в цепи

$$I = I_1 - I_2 = \frac{E_1 - E_2}{r_{01} + r_{02} + r}. \quad (1\text{-}45)$$

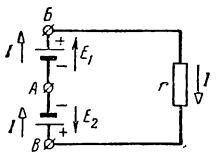


Рис. 1-11. Электродвижущая сила и токи в цепи с двумя источниками питания при $E_1 > E_2$.

При встречном направлении э. д. с. источников ток в цепи возможен только при $E_1 \neq E_2$.

Допустим, что $E_1 > E_2$, в этом случае ток цепи будет направлен в ту же сторону, что и бо́льшая э. д. с. E_1 и встречно к E_2 (рис. 1-11). Электродвижущая сила, направленная противоположно току, называется встречной э. д. с. или противо-э. д. с.

Формуле (1-45) можно придать следующий вид:

$$E_1 - E_2 = Ir_{01} + Ir_{02} + Ir, \quad (1\text{-}46)$$

откуда э. д. с. первого источника

$$E_1 = E_2 + Ir_{01} + Ir_{02} + Ir.$$

Напряжение $U_{AБ}$ на зажимах первого источника

$$U_1 = E_1 - Ir_{01} = E_2 + Ir_{02} + Ir, \quad (1\text{-}47)$$

а напряжение U_{BA} на зажимах второго источника

$$U_2 = E_2 + Ir_{02}.$$

Умножив все части уравнения (1-47) на ток I, получим:

$$U_1 I = E_1 I - I^2 r_{01} = E_2 I + I^2 r_{02} + I^2 r. \quad (1\text{-}48)$$

Последнее уравнение представляет секундный баланс энергии рассматриваемой цепи. Мощность $E_1 I$, развиваемая первым источником, за вычетом мощности $I^2 r_{01}$, преобразуемой в тепло в этом источнике, представляет собой мощность $U_1 I$, отдаваемую первым источником во внешнюю, по отношению к нему, цепь. Эта мощность расходуется в сопротивлении r и во втором источнике. Мощность $I^2 r$, получаемая от первого источника, преобразуется в тепло в сопротивлении r. Мощность $I^2 r_{02}$ преобразуется в тепло во втором источнике, являясь его тепловыми потерями. Наконец, мощность $E_2 I$, получаемая вторым источником от первого, преобразуется в нем в химическую или механическую в зависимости от устройства этого источника (аккумулятор, который в этом случае заряжается, или машина постоянного тока, которая в этом случае работает электродвигателем).

Таким образом, источники питания могут работать или в режиме генератора или в режиме потребителя электрической энергии.

Если источник работает в режиме генератора, то его напряжение меньше э. д. с. ($U < E$), а направление тока совпадает с направлением его э. д. с.

Если источник работает в режиме потребителя, то его напряжение больше э. д. с. ($U > E$), а ток и э. д. с. имеют противоположные направления.

1-17. ВТОРОЕ ПРАВИЛО КИРХГОФА

Электрическая цепь, изображенная на рис. 1-12, состоит из двух источников, работающих в генераторном режиме, и трех сопротивлений. Сопротивления r_1 и r_2 можно рассматривать как внутренние сопротивления источников и сопротивления проводов соответствующих участков цепи.

Напряжение между узлами B и $Д$ цепи согласно (1-13):

$$U_{BД} = E_1 - I_1 r_1 = E_2 - I_2 r_2,$$

откуда

$$E_1 - E_2 = I_1 r_1 - I_2 r_2 \qquad (1\text{-}49)$$

или в общем виде

$$\Sigma E = \Sigma I r. \qquad (1\text{-}50)$$

Последнее уравнение известно под названием второго правила Кирхгофа: алгебраическая

сумма всех э. д. с. замкнутого контура электрической цепи равна алгебраической сумме всех падений напряжений (Ir) на сопротивлениях того же контура цепи.

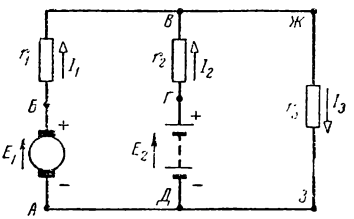


Рис. 1-12. Схема сложной цепи с двумя источниками питания.

При составлении уравнений по второму правилу Кирхгофа э. д. с. приписывается знак «+», если направление ее совпадает с произвольно выбранным направлением обхода контура. Знак «—» приписывается э. д. с., направленной противоположно направлению обхода контура.

Падению напряжения Ir приписывается знак «+», если направление тока в сопротивлении совпадает с направлением обхода контура. Если направление тока противоположно направлению обхода, то падению напряжения приписывается знак «—».

1-18. РАСЧЕТ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Существует большое число методов расчета сложных цепей. С одним из них — методом наложения — мы уже познакомились в § 1-16. Второй метод, метод узловых и контурных уравнений, основан на применении первого и второго правила Кирхгофа.

Для расчета сложной электрической цепи задается схема цепи, величины э. д. с. и полярность источников и сопротивления всех участков цепи. В результате расчета необходимо найти величины и направления токов на всех участках цепи.

Для составлений уравнений по правилам Кирхгофа, кроме заданных величин, необходимо знать направления токов на всех участках цепи. Направлениями токов можно задаться произвольно, показав их стрелками на отдельных участках цепи. Если в результате решений уравнений будет найдено, что какой-либо ток будет иметь отрицательное значение, то это будет обозначать, что действительный ток имеет направление, противоположное выбранному.

Число составленных уравнений должно быть равно числу неизвестных токов. Число составленных узловых уравне-

ний должно быть на единицу меньше числа узлов заданной цепи. При составлении контурных уравнений следует выбирать наиболее простые контуры, в каждом из которых должен содержаться хотя бы один участок цепи, не входивший в ранее составленные уравнения.

Пример 1-13. Определить токи I_1, I_2 и I_3 (рис. 1-12), если $E_1 = 123$ *в*; $E_2 = 115$ *в*; $r_1 = 0{,}15$ *ом*; $r_2 = 0{,}5$ *ом*; $r_3 = 12$ *ом*.

Выберем произвольно направления токов на всех участках цепи. Они указаны на рис. 1-12.

Составим три уравнения, одно по первому правилу Кирхгофа и два — по второму правилу Кирхгофа.

Первое уравнение составляем для точки *В*:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0. \tag{1-51}$$

Второе уравнение составим для контура *АБВЖЗДА*:

$$E_1 = I_1 r_1 + I_3 r_3. \tag{1-52}$$

Третье уравнение — для контура *ДГВЖЗД*:

$$E_2 = I_2 r_2 + I_3 r_3. \tag{1-53}$$

Подставив в два последние уравнения числовые значения, получим

$$123 = 0{,}15 I_1 + 12 I_3; \tag{1-54}$$

$$115 = 0{,}5 I_2 + 12 I_3. \tag{1-55}$$

Подставив в последнее уравнение ток $I_2 = I_3 - I_1$, получим:

$$115 = 0{,}5 I_3 - 0{,}5 I_1 + 12 I_3 = -0{,}5 I_1 + 12{,}5 I_3. \tag{1-56}$$

Умножив уравнение (1-55) на 0,3 и сложив с уравнением (1-54), получим:

$$\begin{gathered} 34{,}5 = -0{,}15 I_1 + 3{,}75 I_3 \\ 123{,}0 = 0{,}15 I_1 + 12{,}0 I_3 \\ \hline 157{,}5 = 15{,}75 I_3, \end{gathered} \tag{1-57}$$

откуда

$$I_3 = \frac{157{,}5}{15{,}75} = 10\ a.$$

Напряжение между точками *Ж* и *З*:

$$U_{ЖЗ} = I_3 r_3 = 10 \cdot 12 = 120\ в;$$

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ЖЗ}}{r_1} = \frac{123 - 120}{0{,}15} = 20\ a;$$

$$I_2 = \frac{E_2 - U_{ЖЗ}}{r_2} = \frac{115 - 120}{0{,}5} = -10\ a.$$

Знак минус у тока I_2 показывает, что действительное направление этого тока противоположно указанному на рис. 1-12 и что, следовательно, источник E_2 работает в режиме потребителя.

Третий метод расчета сложных цепей — м е т о д у з л о в о г о н а п р я ж е н и я. Он применяется для расчета цепей, имеющих два узла (рис. 1-13). Примем за положительное направление токов в ветвях направление от узла A к узлу $Б$. Напряжение между узлами $Б$ и A, называемое у з л о в ы м н а п р я ж е н и е м, равно разности потенциалов

$$U = \varphi_Б - \varphi_A.$$

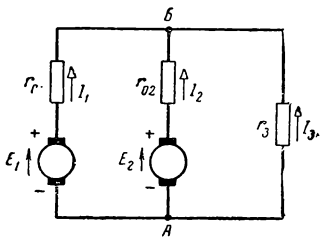


Рис. 1-13. Цепь с двумя узлами.

По закону Ома ток в первой ветви

$$I_1 = \frac{E_1 - U}{r_1} = (E_1 - U)g_1, \quad (1\text{-}58)$$

где r_1 и g_1 — сопротивление и проводимость первой ветви, включая генератор.

Для второй ветви

$$I_2 = \frac{E_2 - U}{r_2} = (E_2 - U)g_2.$$

Для третьей ветви

$$I_3 = (0 - U)g_3 = -Ug_3.$$

По первому правилу Кирхгофа для точки $Б$ можно написать:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0.$$

Подставив в последнее уравнение выражения для токов ветвей, получим:

$$(E_1 - U)g_1 + (E_2 - U)g_2 + (-U)g_3 = 0.$$

Раскрывая скобки, найдем узловое напряжение:

$$U = \frac{E_1 g_1 + E_2 g_2}{g_1 + g_2 + g_3}$$

или в общем виде

$$U = \frac{\Sigma Eg}{\Sigma g}. \quad (1\text{-}59)$$

Таким образом, *узловое напряжение равно отношению алгебраической суммы произведений э. д. с. на проводимости соответствующих ветвей к сумме проводимостей всех ветвей.*

Если одна из э. д. с. направлена от узла B к узлу A, то в формуле (1-58) и (1-59) она подставляется со знаком минус.

Определяя узловое напряжение по формуле (1-59), можно определить и токи в ветвях, так как

$$I_1 = (E_1 - U)g_1,$$

а

$$I_2 = (E_2 - U)g_2.$$

Ради простоты мы рассмотрели цепь с тремя ветвями, аналогично можно рассчитывать цепи с любым числом ветвей.

Пример 1-14. Для цепи с двумя узлами (рис. 1-13) даны: $E_1 = 225$ *в*; $E_2 = 226$ *в*; $r_{01} = r_{02} = 0{,}5$ *ом*; $r_3 = 10$ *ом*. Найти токи в участках цепи.

Вычислим узловое напряжение

$$U = \frac{E_1 g_1 + E_2 g_2}{g_1 + g_2 + g_3} = \frac{225 \cdot 2 + 226 \cdot 2}{2 + 2 + 0{,}1} = 220 \text{ в}.$$

Токи в участках цепи:

$$I_1 = (E_1 - U)g_1 = (225—220) \cdot 2 = 10 \text{ а};$$

$$I_2 = (E_2 - U)g_2 = (226—220) \cdot 2 = 12 \text{ а};$$

$$I_3 = -Ug_3 = -220 \cdot 0{,}1 = -22 \text{ а}.$$

Проверим правильность решения

$$I_1 + I_2 + I_3 = 10 + 12 - 22 = 0.$$

Таким образом, задача решена правильно.

1-19. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Электрическая цепь, сопротивление которой остается неизменным при различных силах тока в ней или при различных напряжениях на ее зажимах, называется л и н е й н о й. Такие цепи и рассматривались нами до сих пор.

Электрическая цепь, имеющая хотя бы один участок (элемент), сопротивление которого зависит от силы тока или напряжения, называется н е л и н е й н о й. Примерами нелинейных элементов могут служить: лампы накаливания, электронные лампы, различные полупроводниковые и другие приборы, широко распространенные в современной технике.

Так как сопротивление (проводимость) нелинейной цепи непостоянно, то, очевидно, ток в такой цепи не пропорционален напряжению на ее зажимах, следовательно, закон Ома неприменим для ее расчета.

Расчет нелинейных цепей выполняется обычно графическими методами, в которых пользуются вольт-амперными характеристиками — графическими зависимостями силы тока от напряжения цепи $I = f(U)$.

Прямая *оа* (рис. 1-14), представляющая зависимость силы тока от напряжения $I = f(U)$, является вольт-амперной характеристикой линейной цепи, так как для любого значения тока (напряжения) отношение I/U, выражающее проводимость цепи, будет постоянно.

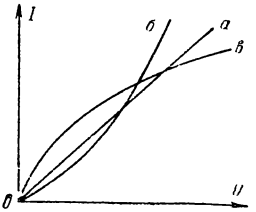


Рис. 1-14. Вольт-амперные характеристики.

Кривые *об* и *ов* — вольт-амперные характеристики нелинейных участков цепи.

Для расчета цепи с двумя последовательно соединенными нелинейными элементами (рис. 1-15) построим в одних осях координат (рис. 1-16) вольт-амперные характеристики каждого элемента цепи $I_1 = f_1(U_1)$ и $I_2 = f_2(U_2)$.

Так как при последовательном соединении напряжение на зажимах цепи равно сумме напряжений на отдельных участках

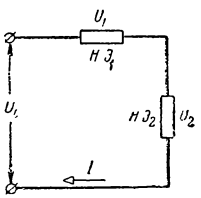


Рис. 1-15. Последовательная цепь с двумя нелинейными элементами.

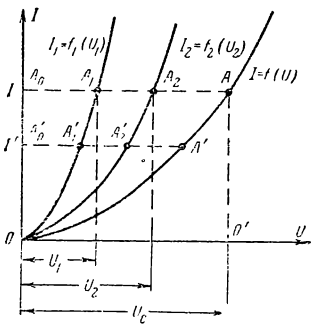


Рис. 1-16. Вольт-амперные характеристики (последовательная цепь).

цепи, то, складывая напряжения U_1 и U_2, соответствующие одному и тому же значению тока, получим точки вольт-амперной характеристики цепи $I = f(U)$ (рис. 1-16). Например, точка A' вольт-амперной характеристики цепи, соответствующая произвольному значению тока I', получена в результате сложения абсцисс $A'_0A'_1$ и $A'_0A'_2$.

Если требуется определить ток цепи при заданном напряжении, то, отложив по оси абсцисс это напряжение сети U_c (O, O') и восстановив перпендикуляр до пересечения с вольт-амперной характеристикой цепи $I = f(U)$, получим точку A. Ордината этой точки и выражает ток цепи I для заданного напряжения. Проведя через точку A линию, параллельную оси абсцисс, получим ее отрезки A_0A_1 и A_0A_2, определяющие напряжения U_1 и U_2 на соответствующих участках цепи.

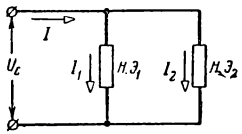


Рис. 1-17. Параллельная цепь с двумя нелинейными элементами.

При параллельном соединении двух нелинейных элементов (рис. 1-17) ток в каждом элементе при напряжении сети U_c можно найти по их вольт-амперным характеристикам (рис. 1-18). Так как напряжение на параллельных ветвях одинаково, то, отложив напряжение U_c (O, O'), находим токи I_1 и I_2 (отрезки OA_1' и OA_2'). Если требуется найти токи I_1 и I_2 по заданному общему току I, то необходимо построить общую вольт-амперную характеристику $I = f(U)$, складывая ординаты вольт-амперных характеристик параллельных ветвей, соответствующие одним и тем же значениям напряжений.

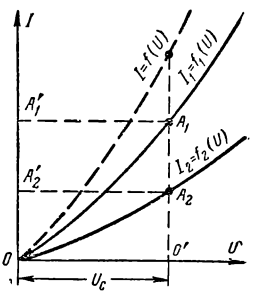


Рис. 1-18. Вольт-амперные характеристики (параллельная цепь).

Пример 1-15. Определить силу тока I и напряжения U_1 и U_2 на двух последовательно соединенных нелинейных элементах при напряжении на зажимах цепи $U_c = 130$ *в*.

Вольт-амперные характеристики строятся по данным табл. 1-4.

Таблица 1-4

К примеру 1-15

U	*в*	0	20	40	60	80	100
I_1	*а*	0	0,11	0,27	0,50	0,80	—
I_2	*а*	0	0,07	0,16	0,28	0,40	0,56

Построив вольт-амперные характеристики участков, находя и складывая абсциссы для одних и тех же значений сил токов: 0,1; 0,2, 0,3, 0,4, 0,5 *а* первого и второго участков и откладывая их, получим точки для построения вольт-амперной характеристики цепи (рис. 1-19).

По этой характеристике для заданного напряжения сети $U_c = 130$ *в* находим силу тока в цепи $I = 0{,}4$ *а*. Проведя через эту точку прямую, параллельную оси абсцисс, найдем напряжение $U_1 = 52$ *в* и $U_2 = 78$ *в*.

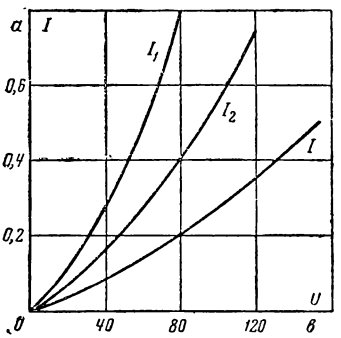


Рис. 1-19. К примеру 1-14.

1-20. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ПОТЕРЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ЛИНИИ

(Перед выполнением работы ознакомиться с § 1-15 и содержанием приложения на стр. 597.)

План работы

1. Записать основные технические данные приборов.
2. Используя медную двухпроводную линию, собрать схему (рис. 1-20) и показать ее руководителю.
3. При трех-четырех значениях нагрузки записать показания амперметра и вольтметров.

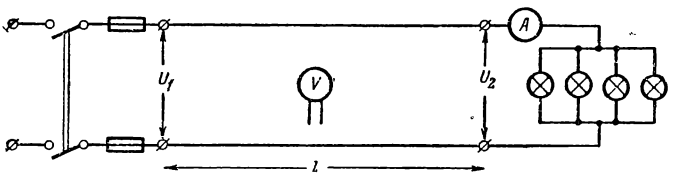


Рис. 1-20. К лабораторной работе: потеря напряжения в линии.

4. Определить потерю напряжения ($\Delta U'$) по показанию вольтметров.
5. Определить ту же потерю напряжения ($\Delta U''$), применяя закон Ома.

Таблица 1-5

№ п/п.	Материал проводов линии	U_1	U_2	I	l	S	γ	$\Delta U'$	$\Delta U''$	ΔP	η
		в	*в*	*а*	*м*	*мм²*	*м/ом · мм²*	*в*	*в*	*вт*	%

6. Подсчитать для каждой нагрузки мощность потерь (ΔP) в линии и ее к. п. д. (η).

7. В том же порядке повторить измерения и расчеты, применяя стальную линию.

8. Наблюдения и расчеты записать в табл. 1-5.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ХИМИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ ТОКА

2-1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ

К проводникам второго рода, обладающим ионной проводимостью, относятся растворы кислот, солей и щелочей, а также некоторые расплавленные соли. Растворы веществ или расплавы, состоящие частично или полностью из ионов, называются электролитами. Молекулы водорода и металлов образуют положительные ионы, а молекулы неметаллических остатков электролитов — отрицательные ионы.

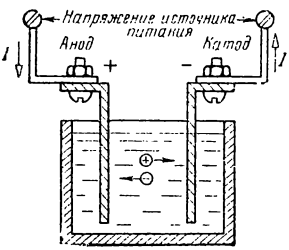


Рис. 2-1. Ток в электролите.

Подведем напряжение от источника питания к двум электродам, погруженным в электролит (рис. 2-1). Под действием электрического поля, направленного от анода к катоду, положительные ионы будут перемещаться в направлении поля к катоду, а отрицательные ионы против поля к аноду. Это движение ионов в электролите и представляет собой ионный ток.

Отрицательные ионы электролита, достигнув анода, отдают ему избыточные электроны, которые перемещаются дальше по цепи. Положительные ионы, достигнув катода, соединяются со свободными электронами, поступающими из цепи. Эти процессы у электродов сопровождаются химическими превращениями. При этом на электродах происходит выделение составных частей электролита.

Согласно закону Фарадея количество выделенного на катоде вещества G пропорционально количеству электричества, прошедшему через электролит, т. е.

$$G = cQ = cIt. \qquad (2\text{-}1)$$

Коэффициент пропорциональности c в формуле (2-1), называемый электрохимическим эквивалентом, равен числу миллиграмм вещества, выделенного на катоде одним кулоном.

Электрохимический эквивалент вещества равен атомному весу вещества A, деленному на его валентность n и на постоянное число 96 500. Таким образом, электрохимический эквивалент

$$c = \frac{10^3}{96\,500}\,\frac{A}{n} \approx 0{,}0104\,\frac{A}{n}.$$

Для различных веществ электрохимический эквивалент имеет разные значения, например для меди 0,329 *мг/к*, для серебра 1,118 *мг/к*.

Процесс выделения на электродах составных частей электролита при прохождении по нему электрического тока называется электролизом.

Электролиз широко применяется для получения чистых металлов, в частности, меди.

Для электролитической очистки меди (рафинирование) в ванны, заполненные электролитом, состоящим из подкисленного серной кислотой раствора медного купороса, опускаются тонкие медные пластины — катоды, на которых в процессе электролиза отлагается электролитическая медь. Анодом, который растворяется в электролите, служат пластины черновой меди, получаемой огневым способом.

Гальванопластика, основы которой были разработаны в 1804 г. академиком Б. С. Якоби, представляет собой процесс осаждения металла на металлических или неметаллических изделиях, применяемый для изготовления рельефных отпечатков, для изготовления типографских клише и печатания рисунков (см. гл. 17).

Гальваностегия — процесс покрытия металлического изделия слоем другого металла для защиты от коррозии или придания изделию красивого вида (хромирование, никелирование).

Электрохимическое полирование — один из прогрессивных методов поверхностной обработки металлов. Оно заключается в растворении всех выступов металла, вследствие чего поверхность становится зеркально гладкой (см. гл. 17).

Рельсы электрифицированных железных дорог служат обратным проводом. При значительных падениях напряже-

ния в них ток на отдельных участках, помимо рельса, может ответвляться и проходить параллельными путями, например по трубопроводам, проложенным в земле в зоне железной дороги.

Места, в которых ток выходит из труб или трубопровода, возвращаясь по земле в рельсы, можно рассматривать как аноды электролитической ванны. Они могут разлагаться и подвергаться быстрому разрушению.

2-2. ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ (ПЕРВИЧНЫЕ) ЭЛЕМЕНТЫ

Химические источники тока (ХИТ) или питания, в которых происходят необратимые процессы преобразования химической энергии в электрическую, называются гальваническими или первичными элементами.

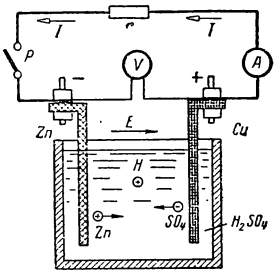


Рис. 2-2. Элемент Вольта и схема его включения.

Простейший гальванический элемент Вольта (рис. 2-2) состоит из двух электродов — цинкового и медного, погруженных в водный раствор серной кислоты. Часть молекул этой кислоты в присутствии воды распадается на положительные (2H) и отрицательные (SO_4) ионы. Цинковый электрод под действием химических сил растворяется в электролите. Положительные ионы цинка переходят в раствор, соединяясь с отрицательными ионами (SO_4), образуют нейтральные молекулы цинкового купороса ($ZnSO_4$). Положительные ионы водорода заряжают электролит положительно. Цинковый электрод заряжается отрицательно. В результате в пограничном слое цинк — электролит создается разность потенциалов, возникает электрическое поле, направленное от электролита к цинковому электроду. Силы поля противодействуют переходу положительных ионов цинка в электролит. По достижении равновесия между силами электрического поля и химическими растворение цинка в электролите прекращается. Часть положительных ионов (2H) нейтрализуется за счет свободных электронов медного электрода, который почти не растворяется в электролите. Вследствие этого медный электрод будет иметь положительный потенциал, мало отличающийся от потенциала электролита.

Электродвижущая сила элемента (э. д. с.) равна разности потенциалов между медным и цинковым электродами — напряжению между электродами, если к элементу не присоединена внешняя цепь. Электродвижущая сила элемента Вольта равна около 1,1 *в*. Электродвижущая сила в элементе направлена от отрицательного электрода (зажима) к положительному и совпадает с направлением тока в нем.

Присоединим к зажимам элемента внешнюю цепь, замкнув рубильник *Р* (рис. 2-2). Под действием э. д. с. в цепи возникнет ток, при этом во внешнем участке цепи электроны будут двигаться от отрицательного зажима к положительному.

Ток вызывает уменьшение зарядов на электродах, а следовательно, уменьшение электрического поля и нарушение равновесия электрических и химических сил. Под действием последних в электролит переходят новые ионы цинка, а ионы водорода, приближаясь к медному электроду, соединяются с его свободными электронами, становясь нейтральными молекулами водорода. Медный электрод покрывается плохо проводящим слоем пузырьков водорода, отделяющим его от электролита. Это явление называется п о л я р и з а ц и е й элемента. Она приводит к уменьшению э. д. с. и увеличению внутреннего сопротивления элемента. Для устранения поляризации применяют д е п о л я р и з а т о р ы — вещества, легко отдающие кислород, например перекись марганца. Кислород деполяризатора, соединяясь с водородом, образует воду, освобождая электрод от плохо проводящего слоя водорода.

В настоящее время из большого числа различных первичных элементов, изготовляемых заводами электротехнической промышленности, наибольшее распространение получили марганцово-цинковые элементы (МЦЭ).

Они изготовляются сухими и наливными.

Последние заливаются электролитом и приводятся в действие непосредственно перед их использованием. Они называются еще резервными, так как могут длительно храниться до заливки их электролитом. Марганцово-цинковые элементы изготовляются стаканчиковой и галетной конструкции.

В марганцово-цинковом элементе стаканчиковой конструкции (рис. 2-3) отрицательный цинковый электрод одновременно является сосудом, имеющим форму цилиндрического или прямоугольного стакана.

Положительным электродом служит угольный стержень, расположенный в центре стакана. Вокруг угольного электрода запрессован деполяризатор (смесь двуокиси марганца, графита и сажи). Пространство между деполяризатором и цинковым стаканом заполняется электролитом, представ-

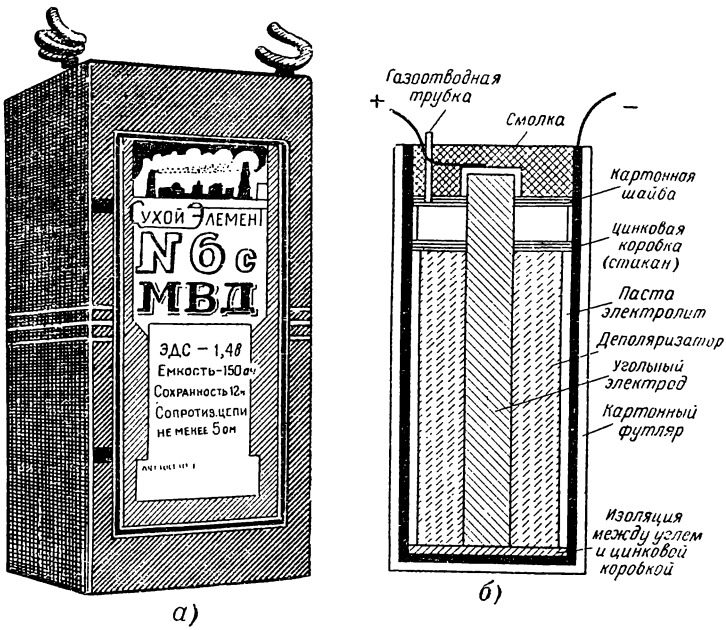


Рис. 2-3. Марганцово-цинковый элемент (МЦЭ) стаканчикового типа.

ляющим водный раствор хлористого аммония (нашатыря) с добавлением некоторых солей и загустителя — муки.

Электродвижущая сила МЦЭ составляет около 1,5 *в*. Наибольший ток, который допускается при использовании элемента, называется *номинальным разрядным током* элемента. Количество электричества, которое можно получить от элемента за время его работы, называется *емкостью* элемента. Емкость измеряется в ампер-часах:

$$1\ a \cdot ч = 3\,600\ a \cdot сек = 3\,600\ к.$$

Марганцово-цинковые элементы выпускаются весом от нескольких грамм до 1 *кг* и более. Из отдельных элементов

собираются батареи с напряжением до 160 *в*. Они применяются для карманных фонарей, слуховых аппаратов, в радиотехнике, аппаратуре связи и т. д.

2-3. АККУМУЛЯТОРЫ (ВТОРИЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ)

Химические источники тока (ХИТ) или питания, работоспособность которых после разряда можно восстановить путем заряда, т. е. путем пропускания тока в направлении, обратном тому, который был при разряде, называются аккумуляторами или вторичными элементами.

При разряде аккумулятора происходит превращение химической энергии в электрическую, при заряде, наоборот, электрическая энергия превращается в химическую.

Конструктивное выполнение ХИТ может быть различным, но в основном аккумуляторы, как и гальванические элементы, состоят из двух электродов, — проводников первого рода, разделенных слоем электролита, — проводником второго рода.

В настоящее время наиболее широкое применение получили аккумуляторы свинцовые или кислотные, кадмиево-никелевые, железо-никелевые или щелочные.

а) *Свинцовые (кислотные) аккумуляторы*

Свинцовый аккумулятор состоит из двух блоков свинцовых пластин, опущенных в сосуд с электролитом (рис. 2-4). Один блок образуется положительными пластинами, спаянными между собой при помощи свинцовой полосы. Другой блок состоит из отрицательных пластин, расположенных между пластинами первого блока.

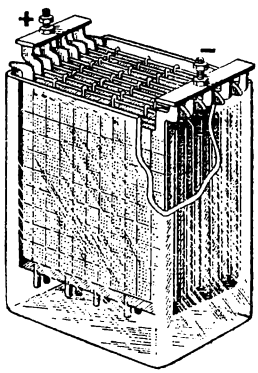


Рис. 2-4. Свинцовый аккумулятор.

Положительные пластины изготовляются из металлического свинца и для увеличения поверхности соприкосновения с электролитом им придают ребристую форму (рис. 2-5).

Отрицательные пластины состоят из свинцовых каркасов, в которые впрессована активная масса. Пластины после

изготовления подвергаются специальной электролитической обработке — формированию.

Электролитом служит 25—35%-ный водный раствор серной кислоты (H_2SO_4).

У заряженного аккумулятора активная масса положительной пластины — анода — состоит из перекиси свинца (PbO_2), а активная масса отрицательной пластины — катода — из губчатого свинца (Pb).

Заряженный аккумулятор, замкнутый на приемник, является источником питания; такой режим работы аккумулятора называется разрядом.

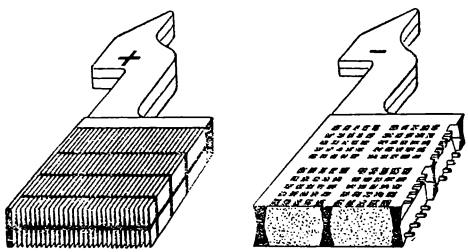


Рис. 2-5. Пластины свинцового аккумулятора.

При разряде перекись свинца и металлический свинец электродов переходят в сернокислые соединения свинца ($PbSO_4$) с выделением воды. Это вызывает уменьшение концентрации электролита, его проводимости и э. д. с. аккумулятора.

При заряде реакция идет в обратном порядке.

Электродвижущая сила заряженного аккумулятора 2,2 *в*.

При разряде напряжение на зажимах аккумулятора сначала быстро падает с 2,2 до 2 *в*, а затем медленно до 1,8 *в*. При дальнейшем уменьшении напряжения разряд аккумулятора следует прекратить во избежание его повреждения.

При заряде через аккумулятор должен проходить ток, имеющий направление, противоположное току при разряде, поэтому положительный зажим (плюс) источника, от которого будет заряжаться аккумулятор, должен быть соединен с плюсом аккумулятора, а минус аккумулятора с катодом источника. При заряде напряжение на аккумуляторе сначала быстро растет до 2,2 *в*, а затем медленно до 2,3 *в*. Когда

процесс заряда закончится, начинается выделение водорода, который в виде пузырьков поднимается на поверхность электролита (кипение аккумулятора). В это время напряжение достигает 2,6—2,7 *в* и заряд следует прекратить, отсоединив аккумулятор.

Количество электричества Q, которое можно получить от заряженного аккумулятора, называется его емкостью и измеряется в ампер-часах.

Отношение отданного аккумулятором при разряде количества электричества к полученному им при заряде носит название коэффициента отдачи

$$\eta_0 = \frac{Q_р}{Q_з}; \qquad (2\text{-}2)$$

коэффициент отдачи свинцового аккумулятора 0,9—0,95.

Отношение полученной от аккумулятора при разряде энергии $W_р$ к затраченной при заряде $W_з$ называется коэффициентом полезного действия

$$\eta = \frac{W_р}{W_з}; \qquad (2\text{-}3)$$

к. п. д. свинцового аккумулятора 0,75—0,8.

Неправильная эксплуатация свинцового аккумулятора вызывает уменьшение его емкости или выход его из строя. Аккумулятор должен быть чистым, зажимы его должны быть покрыты тонким слоем технического вазелина во избежание окисления. Не реже 1 раза в декаду следует проверять уровень электролита и его заряженность. Аккумулятор должен периодически заряжаться, так как хранение незаряженного аккумулятора недопустимо.

Неправильное включение аккумулятора на заряд, недозаряд и хранение незаряженного аккумулятора, понижение уровня электролита и его высокая плотность приводят к сульфатации аккумулятора — его повреждению, при котором мелкокристаллический сульфит свинца переходит в нерастворимые химические соединения, не принимающие участия в работе аккумулятора.

б) *Щелочные аккумуляторы*

Щелочные аккумуляторы состоят из двух блоков пластин, опущенных в закрытый стальной сосуд, наполненный электролитом (рис. 2-6).

Электроды щелочных аккумуляторов представляют собой стальные рамки с вставленными в них плоскими прямоугольными коробочками из перфорированной стальной ленты. Коробочки заполнены активной массой. У кадмиево-никелевого элемента активная масса у положительных пластин состоит из гидрата окиси никеля $Ni(OH)_3$, а у отрицательных — из губчатого кадмия. У железо-никелевого элемента активная масса положительных пластин

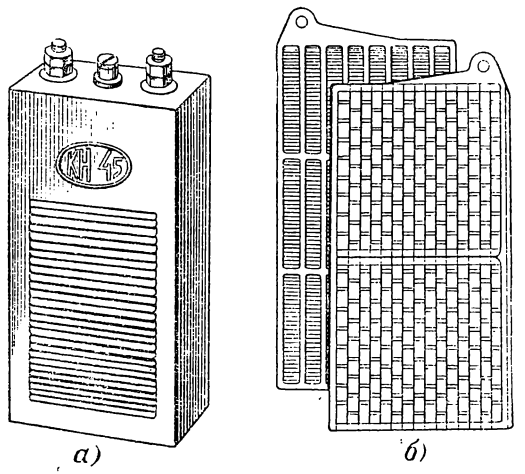


Рис. 2-6. Щелочной аккумулятор:
а — общий вид; *б* — пластины.

также состоит из гидрата окиси никеля, а у отрицательных пластин — из губчатого железа.

Электролитом служит 21%-ный водный раствор едкого кали (КОН) или едкого натра (NaOH).

При разряде гидрат окиси никеля переходит в гидрат закиси никеля, а губчатое железо (кадмий) — в гидрат закиси железа (кадмия). При заряде реакция идет в обратном направлении. Электродвижущая сила заряженного аккумулятора 1,4 *в*.

При разряде напряжение с 1,4 *в* сначала быстро падает до 1,3 *в*, а затем медленно — до 1,15 *в*, при котором и следует прекращать разряд. При заряде напряжение с 1,15 *в*, быстро поднявшись до 1,75 *в*, несколько падает, а затем медленно поднимается до 1,85 *в*.

Внутреннее сопротивление щелочных аккумуляторов значительно выше, чем у кислотных, поэтому, с одной стороны, они имеют более низкий к. п. д. — 0,5—0,6, а с другой, менее чувствительны к коротким замыканиям.

Щелочные аккумуляторы имеют большую механическую прочность, меньший вес по сравнению с свинцовыми аккумуляторами и менее требовательны к уходу.

2-4. СОЕДИНЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Если номинальные напряжение и ток потребителя превышают соответствующие величины источника питания, то последние соединяются для совместной работы последовательно, параллельно или группами, образуя батареи элементов.

Последовательное соединение (рис. 2-7) применяется в том случае, если напряжение потребителя U больше э. д. с. отдельного элемента E_0, а номинальный ток потребителя не превышает разрядного тока элемента.

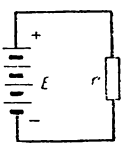


Рис. 2-7. Последовательное соединение источников питания.

Число элементов n, соединяемых последовательно, определяется отношением

$$n \geqslant \frac{U}{E_0}.$$

Элементы должны иметь одинаковое значение э. д. с. и одинаковое направление их, что обеспечивается соединением отрицательного зажима первого элемента с положительным зажимом второго и т. д.

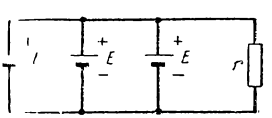


Рис. 2-8. Параллельное соединение источников питания.

В этом случае э. д. с. батареи

$$E = nE_0, \qquad (2\text{-}4)$$

внутреннее сопротивление ее

$$r = nr_0, \qquad (2\text{-}5)$$

а разрядный ток батареи равен разрядному току одного элемента.

Параллельное соединение (рис. 2-8) применяется в том случае, если ток потребителя I больше разрядного тока элемента $I_р$, а напряжение потребителя равно напряжению элемента. При параллельном соединении положительные

зажимы элементов соединяются в один узел, а отрицательные — в другой.

Соединяемые элементы должны иметь одинаковые э. д. с. и одинаковые внутренние сопротивления.

Число элементов m, соединяемых параллельно, определяется отношением

$$m \geqslant \frac{I}{I_р}.$$

При этом соединении э. д. с. батареи равна э. д. с. элемента

$$E = E_0, \tag{2-6}$$

внутреннее сопротивление батареи

$$r = \frac{r_0}{m}, \tag{2-7}$$

а разрядный ток батареи равен разрядному току элемента, умноженному на число элемента:

$$I = I_р m. \tag{2-8}$$

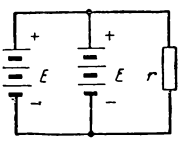


Рис. 2-9. Групповое соединение источников питания.

Групповое соединение это сочетание последовательного и параллельного соединения элементов (рис. 2-9). Оно применяется в том случае, если напряжение и ток потребителя больше напряжения и разрядного тока элемента. Число последовательно соединенных элементов n в группе и число параллельных групп m определяются по ранее рассмотренным формулам.

Пример 2-1. Определить число аккумуляторов и способ их соединения для питания аварийного освещения мощностью 1,75 *квт* при напряжении 110 *в*. Электродвижущая сила аккумулятора $E = 2$ *в*, разрядный ток его $I_р = 6$ *а*.

Ток потребителя

$$I = \frac{P}{U} = \frac{1\,750}{110} \approx 16 \text{ а}.$$

Вследствие того, что напряжение и ток потребителя превышают напряжение и разрядный ток элемента, применим групповое соединение.

Число последовательно соединенных элементов в одной группе

$$n \geqslant \frac{U}{E_0} = \frac{110}{2} = 55;$$

число параллельных групп

$$m \geqslant \frac{I}{I_р} = \frac{16}{6} = 2{,}5,$$

выбираем $m = 3$.
Общее число аккумуляторов $nm = 55 \cdot 3 = 165$.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

3-1. МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ. МАГНИТНЫЙ ПОТОК

Магнитное поле, так же как и электрическое поле, является одной из сторон электромагнитного поля и представляет собой один из видов материи. Оно возникает, например, при движении электрических зарядов и, в частности, вокруг проводов с током. Магнитное поле обладает энергией, называемой энергией магнитного поля, которая проявляет себя различным образом, например в действии одного провода с током на другой провод с током, находящийся в магнитном поле первого, или в действии магнитного поля проводника с током на магнитную стрелку.

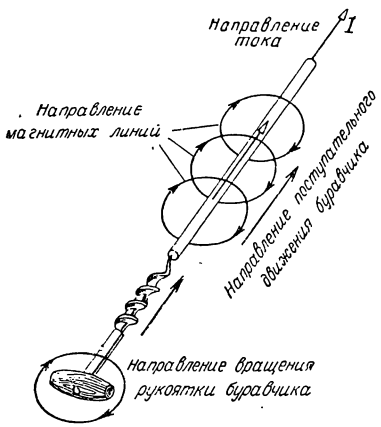


Рис. 3-1. Правило буравчика.

Направление, которое указывается северным концом магнитной стрелки, установившейся под действием сил магнитного поля, принимается за направление магнитного поля.

Магнитное поле изображается магнитными линиями (линиями магнитной индукции). Они проводятся так, чтобы направление касательной в каждой точке линии совпадало с направлением поля.

Направление магнитного поля связано с направлением тока. Эта связь устанавливается правилом буравчика: *если поступательное движение буравчика совпадает с направлением тока* (рис. 3-1), *то направление вращения*

рукоятки буравчика укажет направление магнитных линий. Иногда лучше пользоваться другой формулировкой этого правила: *если направление вращения рукоятки буравчика совпадает с направлением тока в контуре* (рис. 3-2), *то*

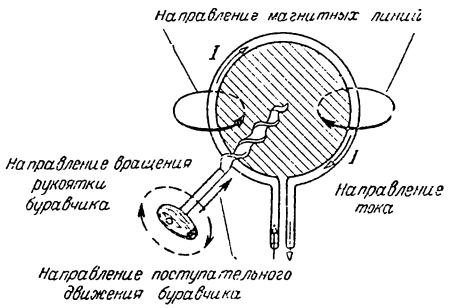


Рис. 3-2. Правило буравчика для кольцевого тока.

поступательное движение его укажет направление магнитных линий, пронизывающих поверхность, ограниченную контуром.

Поместим в магнитное поле перпендикулярно его направлению участок прямолинейного провода длиной l, по которому проходит ток I (рис. 3-3).

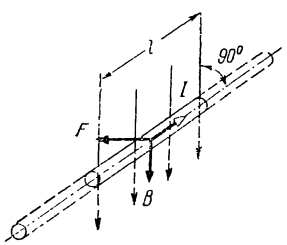


Рис. 3-3. Провод с током в магнитном поле.

Из опыта можно убедиться, что на участок провода будет действовать сила F, по величине пропорциональная току, длине участка проводника и интенсивности магнитного поля, которая характеризуется величиной магнитной индукции B.

Таким образом, сила

$$F = IBl. \qquad (3\text{-}1)$$

Из написанного следует, что

$$B = \frac{F}{Il}, \qquad (3\text{-}2)$$

т. е. магнитная индукция измеряется отношением механической силы, действующей на участок провода, по которому проходит ток, к произведению тока и длины участка про-

вода, причем провод должен быть расположен перпендикулярно направлению поля.

В международной системе единиц (СИ) сила измеряется в ньютонах, ток — в амперах, длина — в метрах, поэтому единица измерения магнитной индукции

$$[B] = \left[\frac{F}{Il}\right] = \frac{н}{а \cdot м} = \frac{дж/м}{а \cdot м} = \frac{в \cdot к}{а \cdot м^2} = \frac{в \cdot а \cdot сек}{а \cdot м^2} = \frac{в \cdot сек}{м^2}.$$

Единица вольт-секунда называется вебер (*вб*), а вебер, деленный на квадратный метр, — тесла (*тл*), таким образом:

$$[B] = \frac{вб}{м^2} = тл.$$

Кроме единицы тесла, магнитная индукция иногда измеряется в гауссах (*гс*) — единице, не принадлежащей к системе СИ, при этом

$$1\ гс = 10^{-4}\ тл, \text{ или } 1\ тл = 10^4\ гс.$$

Магнитная индукция — векторная величина. Направление вектора магнитной индукции совпадает с направлением поля в данной точке.

Магнитное поле, во всех точках которого векторы магнитной индукции одинаковы по величине и параллельны друг другу, называется однородным.

Магнитные линии можно использовать не только для указания направления поля, но и для характеристики его интенсивности. Для этого условно через квадратный сантиметр поверхности, перпендикулярной к направлению поля, проводят число линий, равное или пропорциональное величине магнитной индукции в данном месте поля.

Произведение магнитной индукции B на площадь S, перпендикулярную к вектору магнитной индукции, называется магнитным потоком, т. е.

$$\Phi = BS. \tag{3-3}$$

Так как магнитная индукция измеряется в теслах (*тл*), а площадь — в квадратных метрах, и учитывая, что $1\ тл = \frac{1\ вб}{1 м^2}$, получим, что магнитный поток измеряется в веберах:

$$[\Phi] = тл \cdot м^2 = \frac{вб}{м^2} \cdot м^2 = вб.$$

Более мелкой единицей магнитного потока, не относящейся к системе СИ, является м а к с в е л л

$$1\ мкс = 10^{-8}\ вб = 1\ гс \cdot см^2.$$

Так как магнитная индукция характеризуется числом магнитных линий, проходящих через единицу площади ($см^2$) поверхности, перпендикулярной направлению поля, то магнитный поток будет характеризоваться числом линий, проходящих через площадь S.

3-2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИЛА

а) *Прямолинейный провод в магнитном поле*

Сила, с которой магнитное поле действует на провод с током, расположенный в этом поле, называется э л е к т р о м а г н и т н о й с и л о й.

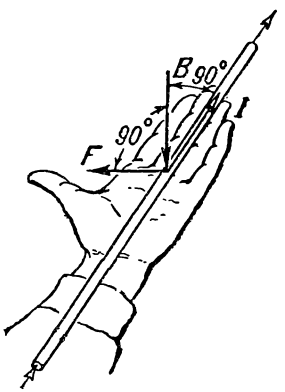


Рис. 3-4. Правило левой руки.

В соответствии со сказанным в предыдущем параграфе электромагнитная сила зависит от тока I, магнитной индукции B и активной длины провода l, т. е. той его части, которая расположена в магнитном поле. Если провод и вектор магнитной индукции взаимно перпендикулярны, то сила имеет наибольшее значение и определяется по формуле (3-1). Направление электромагнитной силы определяется по п р а в и л у л е в о й р у к и: *расположим ладонь левой руки так, чтобы вектор магнитной индукции входил в нее, четыре вытянутые пальца совпадали с направлением тока, тогда отогнутый под прямым углом большой палец левой руки укажет направление электромагнитной силы* (рис. 3-4). Если угол α между проводом и направлением вектора B не равен 90°, то электромагнитная сила будет пропорциональна $\sin\alpha$, т. е. в этом случае

$$F = BIl \sin\alpha. \qquad (3\text{-}4)$$

Пример 3-1. В однородном магнитном поле с индукцией 1,2 *тл* расположен провод с активной длиной 30 *см*. Ток в проводе 500 *а*.

Определить электромагнитную силу, действующую на провод, если провод перпендикулярен вектору магнитной индукции

$$F = BIl = 1{,}2 \cdot 500 \cdot 0{,}3 = 180 \text{ н},$$

или, так как 1 $н = 0{,}102$ $кГ$,

$$F = 180 \cdot 0{,}102 = 18{,}36 \text{ кГ}.$$

Если прямолинейный провод с током (рис. 3-5) под действием электромагнитной силы переместится на расстояние b, параллельно самому себе, в однородном магнитном поле, перпендикулярно магнитным линиям, то электромагнитной силой будет совершена механическая работа

$$A = Fb = IBlb = IBS = I\Phi, \tag{3-5}$$

где $S = lb$ — площадь, описанная проводом.

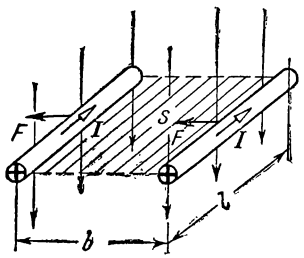


Рис. 3-5. Перемещение проводника в магнитном поле на расстояние b.

Таким образом, механическая работа, совершенная электромагнитной силой при перемещении провода с током в магнитном поле, равна произведению тока на пересеченный проводом магнитный поток.

Пример 3-2. Определить работу, совершенную при перемещении провода длиной 40 *см* с током 200 *а* в однородном поле с магнитной индукцией 1,5 *тл*. Провод переместился в плоскости, перпендикулярной к магнитным линиям, на 25 *см*.

Магнитный поток, пересеченный проводом:

$$\Phi = BS = 1{,}5 \cdot 0{,}4 \cdot 0{,}25 = 0{,}15 \text{ вб}.$$

Работа, совершенная при перемещении провода:

$$A = \Phi I = 0{,}15 \cdot 200 = 30 \text{ дж}.$$

б) *Контур в магнитном поле*

На рис. 3-6 показана прямоугольная катушка (рамка) с током. Стороны рамки, расположенные перпендикулярно плоскости рисунка, находятся в однородном магнитном поле. Вследствие этого на эти стороны действуют электромагнитные силы F, создающие вращающий момент. Под действием этого вращающего момента рамка с током стремится занять положение, при котором эти силы взаимно

уравновесятся (рис. 3-7), при этом поверхность, ограниченную рамкой, пронизывает наибольший магнитный поток. Отсюда следует правило: контур с током, расположенный в магнитном поле, под действием электромагнитных сил стремится занять положение, при котором магнитный поток, пронизывающий контур, будет наибольшим.

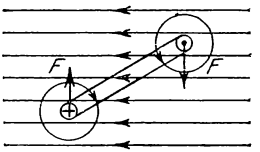


Рис. 3-6. Вращающий момент, действующий на контур с током в магнитном поле.

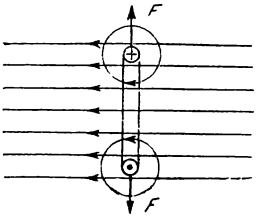


Рис. 3-7. Электромагнитные силы, действующие на контур с током, стремятся раздвинуть стороны рамки.

в) *Движущийся электрон в магнитном поле*

Ток в проводе представляет собой направленное движение свободных электронов. Электромагнитная сила, действующая на провод длиной l (3-1):

$$F = IBl.$$

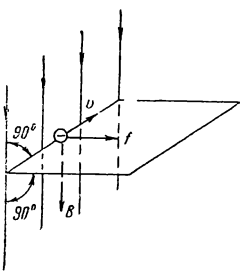


Рис. 3-8. Направление электромагнитной силы, действующей на движущийся электрон.

Если число свободных электронов в объеме провода длиной l обозначим через N, то электромагнитная сила, действующая на отдельный электрон:

$$f = \frac{F}{N}.$$

Обозначив заряд электронов $Q = Nq$ и среднюю скорость движения электронов $v = l/t$, напишем выражение электромагнитной силы, действующей на электрон, движущийся перпендикулярно магнитным линиям поля:

$$f = \frac{F}{N} = \frac{Q}{t} Bl \frac{1}{N} = \frac{Nq}{t} Bl \frac{1}{N} = Bqv. \qquad (3\text{-}6)$$

Направление этой силы (рис. 3-8) определяется по правилу левой руки, но четыре вытянутые пальца руки должны быть направлены в сторону, противоположную направлению движению электрона.

3-3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРОВОДОВ С ТОКАМИ

По двум параллельным прямолинейным проводам, находящимся на расстоянии a друг от друга, проходят токи I_1 и I_2 (рис. 3-9).

Вокруг каждого провода с током возникает магнитное поле, поэтому на провод с током I_1, находящийся в магнит-

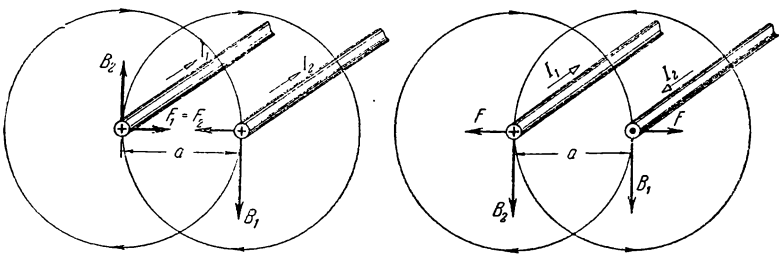


Рис. 3-9. Электромагнитные силы взаимодействия между проводами с током.

ном поле тока I_2, будет действовать электромагнитная сила F_1, а на провод с током I_2, находящийся в магнитном поле тока I_1 — электромагнитная сила F_2.

Опытным путем установлено, что силы F_1 и F_2, действующие на провода, всегда равны друг другу, так как действие равно противодействию, т. е. $F_1 = F_2$.

Провода с токами одного направления п р и т я г и в а ю т с я, а провода с токами противоположных направлений о т т а л к и в а ю т с я друг от друга. В этом легко убедиться, применяя правило буравчика и правило левой руки.

Если длина участка, на котором провода расположены параллельно друг другу — длина сближения проводов l значительно больше расстояния a между ними, то сила F пропорциональна произведению токов, длине их сближения, обратно пропорциональна расстоянию между ними и зависит от среды, в которой расположены провода, т. е.

$$F_1 = F_2 = F = \mu_a \frac{I_1 I_2}{2\pi a} l. \qquad (3\text{-}7)$$

Величина μ_a — абсолютная магнитная проницаемость — характеризует магнитные свойства среды, в которой возникает магнитное поле.

Если токи в проводах равны $I_1 = I_2 = I$, то сила

$$F = \mu_a \frac{I^2}{2\pi a} l.$$

Силы взаимодействия между проводами с током могут достигать особенно больших значений при коротких замыканиях.

Согласно формулам (3-1) и (3-7) сила, действующая на провода с током:

$$F = B_1 I_2 l = B_2 I_1 l = \mu_a \frac{I_1 I_2}{2\pi a} l,$$

а магнитная индукция в точках, расположенных на расстоянии a от оси проводов с токами согласно (3-2):

$$B_1 = \mu_a \frac{I_1}{2\pi a} \text{ и } B_2 = \mu_a \frac{I_2}{2\pi a}.$$

Таким образом, во всех точках, расположенных на одинаковом расстоянии a от оси провода с током, магнитная индукция имеет одинаковые значения

$$B = \mu_a \frac{I}{2\pi a}. \qquad (3\text{-}8)$$

3-4. МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Магнитная индукция поля зависит от тока, размеров и формы проводника с током и от свойств среды, в которой создается магнитное поле. Сравнивая магнитную индукцию в вакууме и в различных средах, при всех прочих равных условиях установлено, что в одних средах магнитное поле получается более сильным, а в других — более слабым, чем в вакууме. Это объясняется различными магнитными свойствами сред. Величиной, характеризующей магнитные свойства среды, как указывалось выше, является а б с о л ю т н а я м а г н и т н а я п р о н и ц а е м о с т ь.

Из уравнения (3-8):

$$\mu_a = B \frac{2\pi a}{I}.$$

Так как магнитная индукция измеряется в теслах = = *в* · *сек*/*м*^{2}, расстояние — в метрах; а ток — в амперах, то

$$[\mu_a] = \frac{в \cdot сек \cdot м}{м^2 \cdot а} = \frac{ом \cdot сек}{м} = \frac{гн}{м}.$$

Так как ом/секунда называется генри (*гн*), то единицей магнитной проницаемости будет генри на метр.

Из опытов известно, что абсолютная магнитная проницаемость воздуха и всех веществ, за исключением ферромагнитных материалов, имеет значение, близкое к абсолютной магнитной проницаемости вакуума, которая называется магнитной постоянной:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ гн/м. \qquad (3\text{-}9)$$

Абсолютная магнитная проницаемость материалов выражается произведением магнитной постоянной μ_0 и магнитной проницаемости μ, показывающей, во сколько раз абсолютная магнитная проницаемость данного материала больше магнитной постоянной. Таким образом,

$$\mu_a = \mu\mu_0.$$

Приняв во внимание, что для воздуха $\mu = 1$ и, следовательно, $\mu_a = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ *гн*/*м*, запишем формулу (3-8) в новом, более удобном для расчета виде:

$$B = 4\pi \cdot 10^{-7}\frac{I}{2\pi a} = \frac{2I}{a} \cdot 10^{-7}, \qquad (3\text{-}10)$$

где B — в теслах, I — в амперах, a — в метрах.

Пример 3-3. Определить значение магнитной индукции на расстоянии 5 *см* от оси провода с током 800 *а*:

$$B = \frac{2I}{a} \cdot 10^{-7} = \frac{2 \cdot 800}{0{,}05} \cdot 10^{-7} = 32 \cdot 10^{-4}\ тл.$$

Пример 3-4. Определить силу, действующую на каждый из двух параллельных проводов длиной 2 *м* при расстоянии между ними 10 *см*, если по проводам проходит ток короткого замыкания $I_1 = I_2 = 10\,000$ *а*:

$$F = \mu_a \frac{I}{2\pi a} l = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{10\,000^2 \cdot 2}{2\pi \cdot 0{,}1} = 400\ н.$$

3-5. НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ. МАГНИТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

При расчетах магнитных полей часто пользуются величиной, называемой напряженностью магнитного поля. Она определяется отношением магнитной индукции в данной

точке поля к абсолютной магнитной проницаемости. Таким образом, напряженность поля

$$H = \frac{B}{\mu_a} = \frac{B}{\mu\mu_0}. \qquad (3\text{-}11)$$

В международной системе единиц магнитная индукция измеряется в теслах (1 *тл* = 1 *в* · *сек*/*м*^{2}), магнитная проницаемость — в генри на метр, а напряженность поля — в амперах на метр:

$$[H] = \frac{тл}{гн/м} = \frac{в \cdot сек}{м^2} \cdot \frac{м}{ом \cdot сек} = \frac{а}{м}.$$

Вторая единица напряженности поля, которой иногда пользуются, не относящаяся к системе СИ — эрстед (*э*):

$$1\ э \approx 80\ а/м. \qquad (3\text{-}12)$$

Напряженность магнитного поля подобно магнитной индукции является вектором, совпадающим по направлению с направлением поля в данной точке.

Так как магнитная индукция пропорциональна μ_a (3-8), а напряженность поля равна магнитной индукции, деленной на μ_a (3-11), то, очевидно, напряженность поля в однородной среде не зависит от магнитной проницаемости, а следовательно, и от свойств среды.

По аналогии с электрическим напряжением произведение напряженности магнитного поля и участка длины магнитной линии называется магнитным напряжением

$$U_м = Hl. \qquad (3\text{-}13)$$

Магнитное напряжение измеряется в амперах, так как

$$[U_м] = \frac{а}{м} \cdot м = а.$$

Магнитное напряжение, взятое по всей длине линии магнитной индукции, называется магнитодвижущей силой (м. д. с.) или намагничивающей силой (н. с.) и обозначается буквой $F_м$.

3-6. ЗАКОН ПОЛНОГО ТОКА

Магнитная индукция в точке, расположенной на расстоянии a от оси провода (рис. 3-10) с током по формуле (3-8):

$$B = \mu_a \frac{I}{2\pi a}.$$

Разделив правую и левую часть написанного выражения на абсолютную магнитную проницаемость, получим напряженность магнитного поля на расстоянии a от провода с током

$$H = \frac{B}{\mu_a} = \frac{I}{2\pi a}, \qquad (3\text{-}14)$$

откуда

$$I = H2\pi a = Hl,$$

где $l = 2\pi a$ — длина окружности или длина магнитной линии вокруг прямолинейного провода с током.

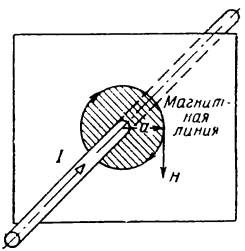


Рис. 3-10. Провод с током, проходящий через поверхность, перпендикулярную к оси провода.

Произведение напряженности магнитного поля и длины магнитной линии представляет собой м. д. с., следовательно,

$$I = F_м.$$

Если провод состоит из нескольких жил, то ток I можно рассматривать как сумму токов или как полный ток всех жил, т. е. $I = \Sigma I'$ и, следовательно,

$$\Sigma I' = F_м. \qquad (3\text{-}15)$$

Записанное читается так: намагничивающая сила равна полному току (алгебраической сумме токов), пронизывающему поверхность, ограниченную данной магнитной линией.

Записанное соотношение называется законом полного тока, который мы рассмотрели на простейшем примере.

В более общем случае, когда напряженность магнитного поля на разных участках магнитной линии имеет разные значения:

$$F_м = H_1l_1 + H_2l_2 + H_3l_3 + \ldots \qquad (3\text{-}16)$$

3-7. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КАТУШКИ С ТОКОМ

Проведем окружность радиуса R, совпадающую со средней магнитной линией кольцевой катушки (рис. 3-11), имеющей равномерно распределенную обмотку, состоящую из w витков.

Полный ток, пронизывающий поверхность, ограниченную средней магнитной линией, $\Sigma I = Iw$.

Вследствие симметрии напряженность поля H в точках, расположенных на средней магнитной линии, будет одинаковой. Магнитодвижущая сила

$$F_м = Hl = H \cdot 2\pi R.$$

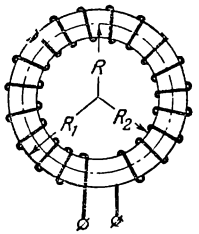


Рис. 3-11. Кольцевая катушка.

Согласно закону полного тока

$$Iw = Hl.$$

Напряженность магнитного поля на средней магнитной линии (осевой линии) кольцевой катушки

$$H = \frac{Iw}{l}, \qquad (3\text{-}17)$$

а магнитная индукция

$$B = \mu_a H = \mu_a \frac{Iw}{l}. \qquad (3\text{-}18)$$

Считая магнитную индукцию на осевой линии, имеющей среднее значение (что допустимо при $R_1 - R_2 \ll R_1$), напишем выражение для магнитного потока катушки

$$\Phi = BS = \mu_a \frac{IwS}{l} \qquad (3\text{-}19)$$

или

$$\Phi = \frac{Iw}{\frac{l}{\mu_a S}} = \frac{F_м}{R_м}. \qquad (3\text{-}20)$$

Зависимость (3-20) аналогична закону Ома для электрической цепи и поэтому называется законом Ома для магнитной цепи; здесь Φ — магнитный поток аналогичен току; $F_м$ — м. д. с. аналогична э. д. с., а $R_м$ — сопротивление магнитной цепи — магнитопровода — аналогично сопротивлению электрической цепи. Под магнитной цепью здесь следует понимать магнитопровод — сердечник, в котором под действием м. д. с. замыкается магнитный поток.

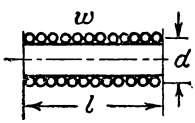


Рис. 3-12. Цилиндрическая катушка.

Цилиндрическую катушку (рис. 3-12) можно рассматривать как часть кольцевой катушки с бесконечно большим

радиусом, с обмоткой, расположенной только на части сердечника, длина которой равна длине катушки. Напряженность поля и магнитная индукция на осевой линии в центре катушки определяются по тем же формулам (3-17) и (3-18), как и для кольцевой катушки. Но для цилиндрической катушки эти формулы являются приближенными. Ими можно пользоваться для определения H и B внутри длинной катушки, длина которой значительно больше ее диаметра.

Пример 3-5. Определить магнитный поток цилиндрической катушки длиной 40 *см*, диаметром 5 *см* и числом витков $w = 1\,500$, если ток в ней 4 *а*. Сердечник катушки изготовлен из неферромагнитного материала ($\mu = 1$):

$$\Phi = \mu_0 \frac{IwS}{l} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 4 \cdot 1\,500 \cdot \pi \cdot 0{,}000625}{0{,}4} = 9{,}2 \cdot 10^{-6} \text{ вб}.$$

3-8. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

а) Электродвижущая сила, наведенная в проводе

Во всяком проводе, который при движении в магнитном поле пересекает магнитные линии, возбуждается электродвижущая сила, получившая название э. д. с. электромагнитной индукции, а само явление — электромагнитной индукцией.

На рис. 3-13 показан провод, движущийся с постоянной скоростью v, в однородном поле, перпендикулярно магнитным линиям.

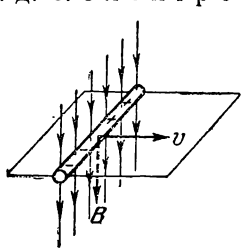


Рис. 3-13. Движение провода в магнитном поле.

При движении провода с той же скоростью v будут перемещаться свободные электроны и положительные ионы провода. Следовательно, на каждую заряженную частицу будет действовать электромагнитная сила (§ 3-2), направление которой определяется по правилу левой руки. Электромагнитные силы вызовут перемещение электронов на один конец провода, создавая на нем отрицательный заряд. На другом конце провода недостаток электронов вызовет положительный заряд. Разделение зарядов закончится, если электромагнитные силы уравновесятся силами электрического поля разделенных зарядов. Разность потенциалов

на концах разомкнутого провода, движущегося в магнитном поле, равна э. д. с. электромагнитной индукции.

Согласно (1-3) э. д. с. на концах провода длиной l:

$$E = \mathscr{E}l.$$

Напряженность электрического поля в проводе

$$\mathscr{E} = \frac{f}{q},$$

а сила, действующая на электрон (3-6), $f = Bvq$, следовательно,

$$E = Bvl, \qquad (3\text{-}21)$$

таким образом, наведенная э. д. с. равна произведению магнитной индукции поля, длины провода и скорости его движения в направлении, перпендикулярном магнитным линиям.

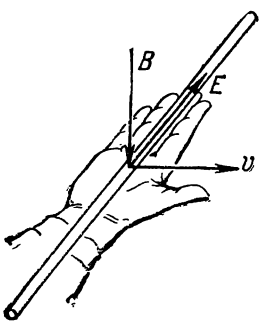


Рис. 3-14. Правило правой руки.

Направление наведенной э. д. с. определяется по правилу правой руки: *ладонь правой руки располагают так, чтобы магнитные линии входили в нее, отогнутый под прямым углом большой палец совмещается с направлением движения проводника, тогда вытянутые четыре пальца укажут направление наведенной э. д. с.* (рис. 3-14).

При определении наведенной э. д. с. в проводнике, движущемся в плоскости, расположенной под углом α к вектору магнитной индукции поля, следует брать слагающую скорости, перпендикулярную к вектору магнитной индукции, т. е. $v_н = v \sin \alpha$.

Движение проводника вдоль магнитных линий ($v \cos \alpha$) не вызывает появления электромагнитных сил (3-4).

Таким образом, э. д. с.

$$\boldsymbol{E = Blv_н = Blv} \sin \alpha. \qquad (3\text{-}22)$$

Если провод движется в плоскости, перпендикулярной магнитным линиям поля, перемещаясь на расстояние Δb за время Δt, то наведенная в нем э. д. с.

$$E = Blv = Bl\frac{\Delta b}{\Delta t}.$$

Так как произведение магнитной индукции B и площади $\Delta S = l\Delta b$ равно магнитному потоку $\Delta\Phi = B\Delta S$, пересеченному проводом при его движении, то наведенная в проводе э. д. с.

$$E = \frac{Bl\,\Delta b}{\Delta t} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \qquad (3\text{-}23)$$

Таким образом, наведенная в проводе э. д. с. равна скорости пересечения проводником магнитного потока.

б) Электродвижущая сила, наведенная в контуре

Определим э. д. с., наведенную в контуре (рис. 3-15), который движется в неоднородном поле, магнитные линии которого (показаны крестиками) перпендикулярны плоскости контура.

При движении контура в направлении, указанном стрелкой, стороны его *3* и *4* не пересекают магнитных линий и, следовательно, в них не наводятся э. д. с. В сторонах *1* и *2* контура наводятся э. д. с. e_1 и e_2, направления которых, найденные по правилу правой руки, показаны стрелками. Величины э. д. с. (3-23):

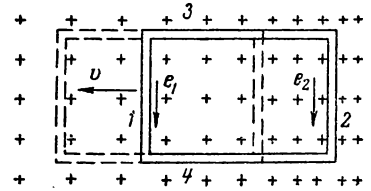


Рис. 3-15. Движение контура в магнитном поле.

$$e_1 = \frac{\Delta\Phi_1}{\Delta t} \quad \text{и} \quad e_2 = \frac{\Delta\Phi_2}{\Delta t},$$

где $\Delta\Phi_1$ и $\Delta\Phi_2$ — потоки, пересеченные сторонами *1* и *2* контура за время Δt. Сторона *1* пересекает поток $\Delta\Phi_1$, который входит в контур, а сторона *2* пересекает $\Delta\Phi_2$, который выходит за пределы контура. При заданном направлении магнитного потока согласно правилу буравчика направление e_2 будет положительным, а e_1 — отрицательным, следовательно, наведенная в контуре э. д. с.

$$e = e_2 - e_1 = \frac{\Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1}{\Delta t}.$$

Обозначив поток, пронизывающий контур до его движения, через Φ_1, а по прошествии времени Δt через Φ_2 (положение контура показано пунктиром), получим:

$$\Phi_2 = \Phi_1 + \Delta\Phi_1 - \Delta\Phi_2.$$

Приращение потока, пронизывающего контур за время Δt:

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = \Delta\Phi_1 - \Delta\Phi,$$

или

$$\Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1 = -\Delta\Phi,$$

а наведенная в контуре э. д. с.

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \tag{3-24}$$

Эта формула дает среднее значение э. д. с. за время Δt. Для определения величины э. д. с. в произвольный момент времени надо найти приращение потока $d\Phi$ за бесконечно малый промежуток времени dt и написать:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}. \tag{3-25}$$

Выражения (3-24) и (3-25) показывают, что необходимым условием возникновения в контуре э. д. с. является изменение магнитного потока, пронизывающего контур.

Если контур состоит не из одного витка, а из w витков, соединенных последовательно, т. е. представляет собой катушку, то индуктированная в ней э. д. с. будет в w раз больше, чем в одном витке, т. е.

$$e = -w\frac{d\Phi}{dt}. \tag{3-26}$$

Произведение из числа витков на пронизывающий их магнитный поток называется потокосцеплением и обозначается буквой Ψ:

$$\Psi = w\Phi, \tag{3-27}$$

следовательно э. д. с.

$$e = -w\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt}, \tag{3-28}$$

т. е. индуктированная в катушке э. д. с. равна скорости уменьшения потокосцепления.

При движении контура в направлении, указанном на рис. 3-15, приращение магнитного потока контура отрицательно, так как $\Delta\Phi_2 > \Delta\Phi_1$ и $\Delta\Phi < 0$, т. е. поток, пронизывающий контур, уменьшается. Следовательно, согласно (3-25) э. д. с. будет положительной и направлена по напра-

влению движения часовой стрелки, будет положителен и направлен, так же как и э. д. с., вызванный ею ток в контуре. Этот ток создает магнитный поток, который по правилу буравчика будет иметь то же направление, что и убывающий магнитный поток. Таким образом, убывание потока, пронизывающего контур, приводит к появлению э. д. с. и тока такого направления, который стремится компенсировать уменьшение потока, сцепленного с контуром.

При движении контура в обратном направлении $\Delta\Phi > 0$ и э. д. с. согласно (3-25) будет отрицательна и направлена против движения часовой стрелки, будет отрицательным и направлен так же, как и э. д. с., вызванный ею ток, а созданный током магнитный поток будет направлен противоположно возрастающему магнитному потоку контура. Таким образом, возрастание потока контура приводит к появлению э. д. с. и тока, который своим магнитным потоком стремится компенсировать увеличение потока контура.

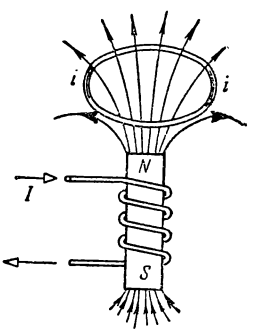


Рис. 3-16. Ток, индуктированный в кольце.

Из рассмотренного можно сделать вывод: если причиной наведения э. д. с. является изменение магнитного потока, пронизывающего контур, то наведенная э. д. с. будет направлена так, что вызванный ею ток будет препятствовать изменению потока контура.

Это положение было установлено в 1833 г. русским академиком Э. Х. Ленцем и называется законом Ленца: *направление наведенной э. д. с. таково, что вызванный ею ток противодействует причине появления э. д. с.*

На рис. 3-16 изображена катушка с сердечником, над которой расположено металлическое кольцо. При увеличении тока в катушке или при сближении кольца и катушки увеличивается магнитный поток, пронизывающий кольцо, и в нем наводится э. д. с. и проходит ток. Согласно закону Ленца направление магнитного потока, созданного током i в кольце, противоположно направлению потока катушки. Применив правило буравчика, легко определить направление индуктированного тока i.

3-9. ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

На рис. 3-17 изображен провод, расположенный в однородном магнитном поле, замкнутый на сопротивление R. При движении провода в направлении вектора скорости v в плоскости, перпендикулярной магнитным линиям, в нем будет наводиться э. д. с. E и под действием ее в замкнутой цепи возникнет ток I. На провод с током в магнитном поле будет действовать электромагнитная сила, величина которой $F = BIl$, а направление, найденное по правилу левой руки, показано на рис. 3-17. Нетрудно видеть, что электромагнитная сила направлена противоположно направлению движения провода и, следовательно, является тормозной силой.

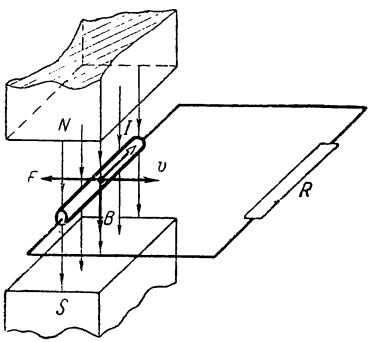


Рис. 3-17. Принцип работы электрического генератора.

Очевидно, для движения провода необходима внешняя сила, равная по величине тормозной силе и направленная противоположно ей, иначе говоря, необходим первичный двигатель, развивающий механическую мощность:

$$P_м = Fv,$$

или

$$P_м = Fv = BIlv = EI = P.$$

В процессе движения провода в магнитном поле развиваемая первичным двигателем механическая мощность при посредстве магнитного поля преобразуется в мощность электрического тока в замкнутой цепи. Следовательно, провод в магнитном поле можно рассматривать как простейший электрический генератор, в котором происходит преобразование механической энергии в электрическую.

Согласно (1-11) э. д. с. генератора

$$E = U + U_0 = IR + Ir_0,$$

откуда

$$P_м = EI = I^2R + I^2r_0 = UI + P_0 = P_п + P_0.$$

Таким образом, механическая мощность $P_м$ равна электрической мощности P, которая распадается на мощность потребителя $P_п = I^2R$ и мощность потерь в генераторе $P_0 = I^2r_0$.

3-10. ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

По проводу, расположенному в однородном магнитном поле, проходит ток от постороннего источника питания (рис. 3-18). На провод будет действовать электромагнитная сила, величина которой

$$F = BIl,$$

а направление, найденное по правилу левой руки, показано на рис. 3-18.

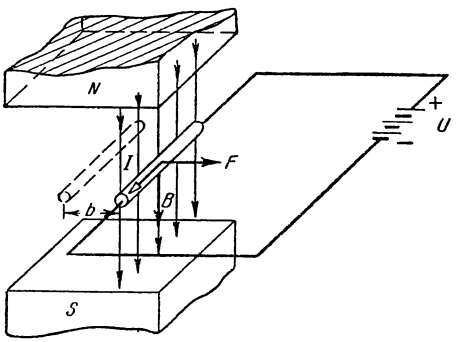


Рис. 3-18. Принцип работы электродвигателя.

Под действием электромагнитной силы провод будет перемещаться в магнитном поле, совершая механическую работу, и в течение всего времени движения в нем будет наводиться э. д. с. E.

При перемещении провода на расстояние b в плоскости, перпендикулярной магнитным линиям, совершенная им механическая работа равна:

$$A_м = Fb = BIlb.$$

За то же время t будет израсходована энергия на нагревание провода

$$W_т = I^2r_0t.$$

Израсходованная источником питания за время t энергия

$$W = UIt = A_м + W_т = BIlb + I^2 r_0 t. \qquad (3\text{-}29)$$

Разделив правую и левую части последнего уравнения на произведение It, получим выражение напряжения U источника питания

$$U = Bl\frac{b}{t} + Ir_0 = Blv + Ir_0 = E + Ir_0.$$

Из написанного следует, что $U - E = Ir_0$, откуда ток

$$I = \frac{U - E}{r_0}. \qquad (3\text{-}30)$$

Электродвижущая сила E, индуктированная в проводе при его движении в магнитном поле, имеет направление, противоположное току, и называется п р о т и в о-э. д. с.

Умножив выражение напряжения на ток I, получим выражение мощности источника питания

$$UI = EI + I^2 r_0 \quad \text{или} \quad UI = P_м + P_0.$$

Таким образом, в процессе движения проводника в магнитном поле полученная им от постороннего источника электрическая мощность при посредстве магнитного поля преобразуется в механическую, причем процесс превращения энергии связан с наведением противо-э. д. с. Следовательно, проводник в магнитном поле, питаемый током от постороннего источника, можно рассматривать, как простейший э л е к т р о д в и г а т е л ь.

Пример 3-6. Провод длиной 0,6 *м* движется со скоростью 15 *м/сек* перпендикулярно направлению магнитного поля с индукцией 1,25 *тл*. Сопротивление провода 0,03 *ом*, к его зажимам приложено напряжение 12 *в*. Определить:

1) мощность цепи; 2) механическую мощность, развиваемую проводом; 3) тепловую мощность.

Противо-э. д. с., наводимая в проводе при его движении в магнитном поле:

$$E = Blv = 15 \cdot 0{,}6 \cdot 1{,}25 = 11{,}25 \text{ в}.$$

Ток в проводе

$$I = \frac{U - E}{r_0} = \frac{12 - 11{,}25}{0{,}03} = 25 \text{ а}.$$

Мощность цепи

$$P = UI = 12 \cdot 25 = 300 \text{ вт}.$$

Механическая мощность

$$P_м = EI = 11{,}25 \cdot 25 = 281{,}25 \text{ вт}.$$

Тепловая мощность

$$P_т = I^2 r_0 = 25^2 \cdot 0{,}03 = 18{,}75 \text{ вт}.$$

3-11. ВИХРЕВЫЕ ТОКИ

В § 3-8 было рассмотрено получение кольцевого тока. Заменим кольцо, расположенное над катушкой с сердечником (рис. 3-16), металлическим диском. На рис. 3-19 изображен такой диск и след полюса электромагнита, расположенного под диском, но не показанного на рисунке. При всяком изменении тока в катушке электромагнита будет изменяться магнитный поток, пронизывающий диск, и в нем аналогично току в кольце будет индуктироваться кольцевой или, как его обычно называют, **вихревой ток** i. Направление вихревого тока определяется так же, как и направление тока в кольце (3-8).

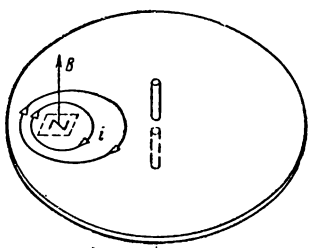


Рис. 3-19. Вихревые токи в диске, вызванные изменением магнитного потока.

На рис. 3-20 изображен такой же диск и след полюса постоянного магнита, расположенного под диском, но не показанного на рисунке. При вращении диска участки его, расположенные над полюсом магнита, будут пересекать магнитные линии магнита, вследствие чего в диске будет наводиться э. д. с. и под влиянием ее возникнет вихревой ток i (рис. 3-20). Направление э. д. с., наведенной на участке диска, расположенном над полюсом, и направление совпадающего с ней вихревого тока на том же участке определяются по правилу правой руки.

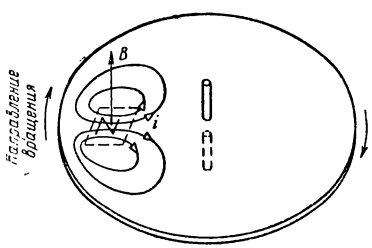


Рис. 3-20. Вихревые токи в диске при неизменном магнитном потоке и вращении диска.

При всяком изменении магнитного потока, пронизывающего проводящее тело или часть его, какую-либо деталь электрической машины, аппарата или прибора, в ней на-

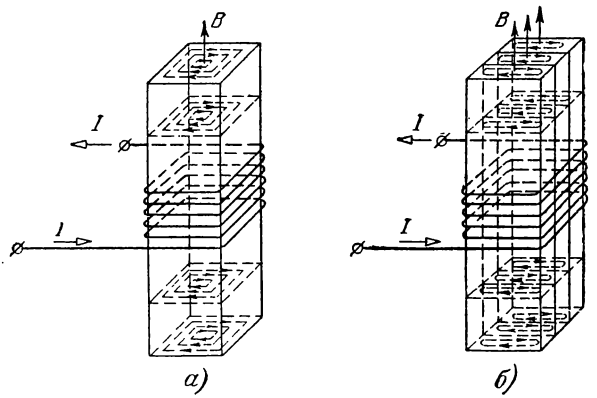


Рис. 3-21. Вихревые токи в стальном сердечнике.

водится э. д. с., под влиянием которой возникают вихревые токи (рис. 3-21, *а* и 3-22, *а*). Вихревые токи, являясь частным случаем наведенных токов, подчиняются общим правилам и законам для токов.

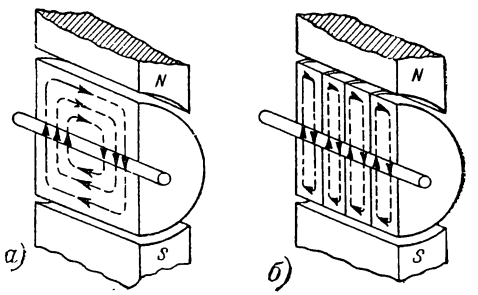


Рис. 3-22. Вихревые токи в якоре электрической машины.

В частности, вихревые токи вызывают нагревание материала, в котором они проходят, и появление магнитных потоков, которые по закону Ленца противодействуют причине, их вызывающей.

Само собой разумеется, что нагревание, вызываемое вихревыми токами, происходит за счет преобразования электрической энергии в тепловую. Таким образом, про-

хождение вихревых токов связано с затратой энергии, которую принято называть потерей на вихревые токи.

В одних случаях вихревые токи применяются в различных устройствах — нагревательных, тормозных (рис. 3-20) или для создания вращающих моментов (рис. 3-19) и приведения в действие приборов автоматики или измерительной техники; в других случаях, более многочисленных, появление их нежелательно, так как вследствие потерь на вихревые токи снижаются коэффициенты полезного действия машин и механизмов и, кроме того, они оказывают размагничивающие действия. В таких случаях стремятся уменьшить их, что достигается применением сердечников, выполненных из отдельных тонких (0,1—0,5 *мм*), изолированных друг от друга листов стали (рис. 3-21, *б* и 3-22, *б*) и применением сортов стали, обладающих большим удельным электрическим сопротивлением, — стали с содержанием 0,5—4% кремния. Мощность потерь в стали на вихревые токи выражается обычно в ваттах на килограмм. Она зависит от сорта стали, максимальной индукции ($B_м$), числа циклов изменения магнитной индукции в секунду (f), толщины листов стали.

3-12. НАМАГНИЧИВАНИЕ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Материалы, обладающие большой магнитной проницаемостью, к которым относятся: сталь, железо, чугун, кобальт и ряд сплавов, например никеля с алюминием, получили название ферромагнетиков. При внесении ферромагнитного сердечника в слабое магнитное поле, например катушки с током, магнитная индукция поля возрастает в сотни или тысячи раз.

Магнитные свойства ферромагнетиков объясняются наличием в них самопроизвольно намагниченных микроскопических областей, которые, ради простоты, можно рассматривать как элементарные магнитики. Под действием внешнего поля, например магнитного поля катушки с током, эти магнитики поворачиваются в направлении поля, вызывая этим усиление магнитной индукции. В магнитной цепи, состоящей преимущественно из ферромагнитных участков, можно получить значительную магнитную индукцию при относительно малой магнитодвижущей силе.

В 1872 г. профессор Московского университета А. Г. Столетов впервые исследовал изменение магнитных свойств стали от напряженности магнитного поля. Изменение напряженности поля производилось изменением тока в намагничивающей катушке, в поле которой помещалась сталь.

А. Г. Столетов (1839—1896).

А. Г. Столетовым была получена зависимость магнитной индукции от напряженности поля, т. е. $B = f(H)$, которая выражается кривой начального намагничивания (рис. 3-23). Кривую можно разделить на три участка: 1) прямолинейный участок *Оа*, который показывает, что магнитная индукция быстро растет почти пропорционально напряженности поля; 2) участок *аб* — колено кривой, который характеризует замедление роста магнитной индукции; 3) участок магнитного насыщения — участок, расположенный выше точки *б*, здесь зависимость между B и H снова прямолинейна, но рост магнитной индукции значительно замедлен по сравнению с первым участком. Этот участок кривой соответствует магнитному насыщению сердечника, при котором почти все элементарные магнитики ориентированы вдоль поля. Рассмотренная нелинейная зависимость указывает на то, что абсолютная магнитная проницаемость ферромагнитных материалов $\mu_a = B/H$ непостоянна и зависит от напряженности магнитного поля, а следовательно, и тока намагничивающей катушки.

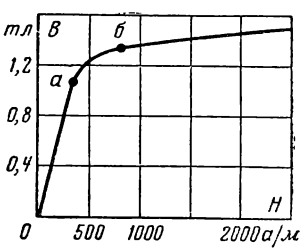


Рис. 3-23. Начальная кривая намагничивания стали.

Рассмотрим процесс перемагничивания ферромагнетиков, который имеет место при работе их в цепях переменного тока.

При увеличении намагничивающего тока, а следовательно, и напряженности поля H магнитная индукция

достигнет максимального значения $+B_м$ (рис. 3-24). Затем при уменьшении напряженности поля будет уменьшаться и магнитная индукция, но при одних и тех же напряженностях магнитная индукция будет несколько большей, чем при увеличении напряженности (участок кривой *АБ*). При нулевой напряженности поля магнитная индукция будет иметь значение B_r, называемое остаточной индукцией (отрезок *ОБ*).

Явление отставания или запаздывания изменений магнитной индукции от соответствующих изменений напряженности поля называется магнитным гистерезисом и обусловлено как бы внутренним трением областей самопроизвольного намагничивания.

При изменении направления намагничивающего тока, а следовательно, и направления напряженности поля она достигнет значения H_c, называемого коэрцитивной силой (отрезок *ОГ*), при котором магнитная индукция $B = 0$.

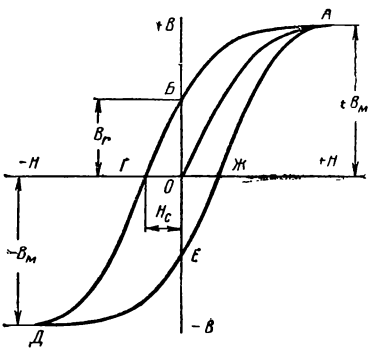


Рис. 3-24. Петля гистерезиса.

При дальнейшем увеличении тока обратного направления магнитная индукция достигнет значения $— B_м$.

Затем при уменьшении тока до нуля будет получена остаточная индукция (отрезок *ОЕ*). Наконец при следующем изменении направления тока и напряженности поля и увеличении ее вновь будет получена максимальная индукция $+ B_м$.

Таким образом, мы проследили за изменением напряженности поля и магнитной индукции за один цикл их изменения. При циклическом перемагничивании ферромагнетика зависимость $B = f(H)$ графически выражается замкнутой кривой *АБГДЕЖА*, называемой симметричной петлей гистерезиса. Наибольшая петля, которая может быть получена для данного материала, называется предельной петлей.

Если для данного ферромагнетика получить несколько симметричных петель гистерезиса с различными $B_м$

(рис. 3-25) и соединить вершины петель, то получим кривую, называемую основной кривой намагничивания, очень близкую к кривой начального намагничивания.

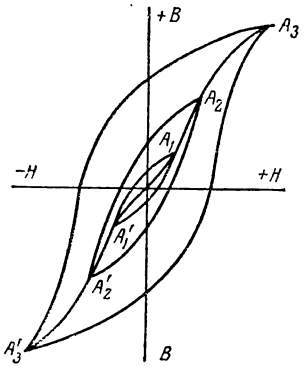


Рис. 3-25. Три петли гистерезиса и основная кривая намагничивания стали.

Перемагничивание стали связано с затратой энергии, которая превращаясь в тепло, вызывает нагрев стали.

Площадь петли гистерезиса пропорциональна энергии, затраченной при одном цикле перемагничивания. Потери энергии, вызванные процессом перемагничивания, называются потерей от гистерезиса.

Мощность потерь на циклическое перемагничивание, выражаемая обычно в ваттах на килограмм, зависит от сорта стали, максимальной магнитной индукции и числа циклов перемагничивания стали в секунду или, что то же, частоты * (f).

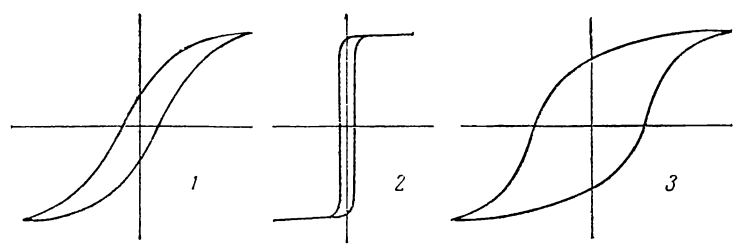


Рис. 3-26.

1 — магнитно-мягкий материал, электротехническая сталь; *2* — магнитно-мягкий материал, пермаллой; *3* — магнитно-твердый материал.

Свойства ферромагнитных материалов характеризуют основной кривой намагничивания и петлей гистерезиса. На рис. 3-26 показаны три типичные петли гистерезиса для важнейших магнитных материалов.

---

* Частота, см. § 5-1 на стр. 120.

3-13. ФЕРРОМАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Ферромагнитные материалы делятся на две группы: магнитно-мягкие и магнитно-твердые.

Магнитно-мягкие материалы применяются в качестве магнитопроводов постоянного и переменного магнитного потоков. Они обладают низким значением коэрцитивной силы (ниже 400 *а/м*), высокой магнитной проницаемостью и низкими потерями. К этой группе материалов относятся: техническое железо и низкоуглеродистые стали, листовые электротехнические стали, железо-никелевые сплавы с высокой проницаемостью (пермаллои) и оксидные ферромагнетики — ферриты и оксиферы.

Техническое железо с содержанием углерода до 0,04%, углеродистые стали и чугун широко применяются для магнитопроводов, работающих в постоянных магнитных полях. Техническое железо обладает высокой индукцией насыщения до 2,2 *тл*, высокой магнитной проницаемостью и низкой коэрцитивной силой.

Электротехнические стали — это сплавы железа с кремнием (1—4%). Путем изменения содержания кремния и применением различных технологических приемов получаются стали с широким диапазоном электромагнитных свойств.

Стали с низким содержанием кремния имеют низкую магнитную проницаемость, большую индукцию насыщения и большие удельные потери, они применяются при постоянном или переменном токе низкой частоты.

Стали с высоким содержанием кремния применяются в тех случаях, когда нужно иметь высокую магнитную проницаемость в слабых и средних полях и малые потери от гистерезиса и вихревых токов, вследствие чего они могут работать при повышенной частоте.

Согласно ГОСТ 802-58 электротехнические стали обозначаются буквой Э и цифрами. Первая цифра обозначает процент содержания кремния, вторая характеризует магнитные свойства, третья — *О* обозначает холодную прокатку стали.

Кривые намагничивания некоторых ферромагнитных материалов даны на рис. 3-27.

Пермаллой представляют собой сплавы различного процентного содержания железа и никеля, а некоторые из них, кроме того, молибдена, хрома, кобальта. Это

сплавы высокой магнитной проницаемости, раз в 10—50 большей, чем проницаемость листовой электротехнической стали. Эти сплавы достигают индукции насыщения при малых напряженностях поля от десятков до нескольких сотен ампер на метр.

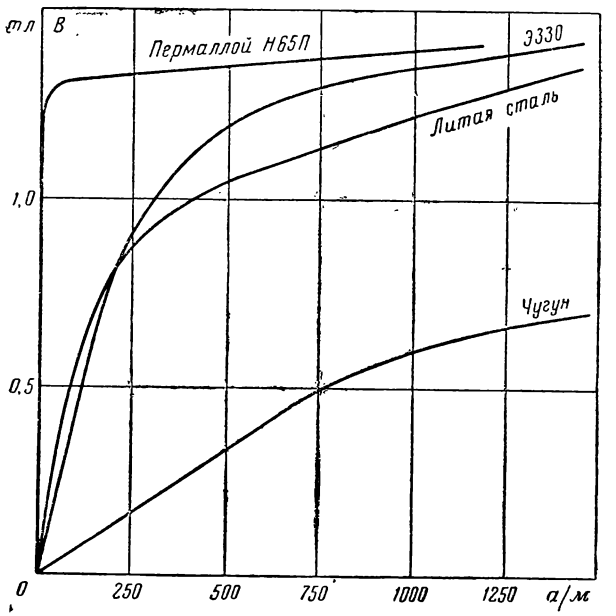


Рис. 3-27. Кривые намагничивания некоторых ферромагнитных материалов.

Одни из них имеют низкую индукцию насыщения порядка 0,6—0,8 *тл*, другие относительно высокую 1,3—1,6 *тл*.

К первой группе относятся, например: МО — пермаллой, содержащий 4—5% молибдена и хромистый пермаллой. Ко второй группе относятся, например: 50-пермаллой, содержащий 50% никеля; 65-пермаллой П и МО — перминвар П, — содержащий железо, никель, кобальт.

Буква П обозначает прямоугольную петлю гистерезиса (рис. 3-28). Степень прямоугольности петли характеризуется отношением остаточной индукции B_r к максимальной индукции $B_м$ для данной петли. Это отношение достигает 0,95—0,99.

Коэрцитивная сила пермаллоев колеблется от 1 до 20 *а/м*.

Магнитные свойства пермаллоев в сильной степени зависят от технологии их изготовления.

Ферритами называют ферромагнитные материалы, получаемые из смеси окислов железа, цинка и других элементов. При изготовлении сердечников смесь размалывается, прессуется, отжигается при температуре порядка 1 200° С, таким образом получаются сердечники нужной формы. Ферриты обладают очень большим удельным сопротивлением, вследствие чего потери на вихревые токи чрезвычайно малы, что дает возможность применять их при высокой частоте.

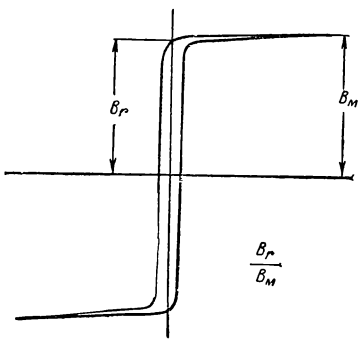


Рис. 3-28. Прямоугольная петля гистерезиса.

Никель-цинковые ферриты, получаемые путем термического разложения солей, получили название оксиферы или оксидные ферромагнетики; они по магнитным свойствам мало отличаются от ферритов.

Как ферриты, так и оксиферы довольно разнообразны по своим магнитным свойствам. Они обладают значительной магнитной проницаемостью на начальной части основной кривой намагничивания, незначительной индукцией насыщения 0,18—0,32 *тл* и малой коэрцитивной силой (8—80 *а/м*).

Магнитодиэлектрики это материалы, получаемые из смеси мелкозернистого ферромагнитного порошка с диэлектриком (полихролвинил и полиэтилен). Смесь формуется, прессуется и запекается.

Ферриты, как и другие магнитодиэлектрики, широко применяются в качестве сердечников в различных трансформаторах аппаратуры проводной и радиосвязи, в магнитных усилителях, вычислительных машинах и в других областях техники.

Кольцевые сердечники из ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса получили очень широкое применение, так как обладают очень ценным свойством намагничиваться под действием импульса тока до состояния насыщения и

после импульса длительно сохранять остаточную индукцию, малоотличающуюся от индукции насыщения.

Магнитно-твердые материалы предназначены для изготовления постоянных магнитов самого различного назначения. Эти материалы характеризуются большой коэрцитивной силой и большой остаточной индукцией.

К магнитно-твердым материалам относятся: углеродистые, вольфрамовые, хромистые и кобальтовые стали. Они обладают коэрцитивной силой 5 000—13 500 *а/м* и остаточной индукцией 0,7—1 *тл*.

Указанные стали обладают ковкостью, поддаются прокатке и механической обработке. Они выпускаются промышленностью в виде полос или листов.

К магнитно-твердым материалам, обладающим лучшими магнитными свойствами, относятся сплавы: ални — сплав железа, алюминия 15%, никеля 25%; алниси отличается от ални наличием кремния 1%; алнико отличается от ални наличием кобальта 7%. Они характеризуются коэрцитивной силой 20 000—60 000 *а/м* и остаточной индукцией 0,4—1,25 *тл*.

Магниты указанных сплавов изготовляются отливкой и поддаются обработке только шлифованием.

Металлокерамические магниты получают путем спекания порошков из сплавов ални и алнико, основным их достоинством является возможность получения магнитов очень малых размеров.

3-14. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Магнитная цепь состоит из источника м. д. с. (катушка с током) и магнитопровода. Магнитопровод почти полностью выполняется из ферромагнитных материалов, с тем чтобы получить наименьшее магнитное сопротивление (3—20), при котором обеспечивается получение нужного по величине и конфигурации магнитного потока при наименьшей м. д. с.

Простейшая магнитная цепь — катушка с кольцевым магнитопроводом — была рассмотрена в § 3-7.

На практике применяются магнитные цепи различной сложности. Они могут быть неразветвлёнными и разветвленными. Участки магнитопровода могут быть выполнены из одного материала или из разных материалов.

Расчет магнитной цепи в большинстве случаев имеет целью для данного магнитопровода определить м. д. с. F,

необходимую для получения заданного потока Ф. Для этого магнитопровод разбивают по длине на участки l_1, l_2 и т. д. с поперечными сечениями S_1, S_2 и т. д., каждый из которых выполнен из одного материала. Для каждого участка вычисляют магнитное напряжение, суммируя которые по всему магнитопроводу (по средней магнитной линии), получают искомую м. д. с.

Магнитное напряжение, например на первом участке, из ферромагнитного материала,

$$U_{м1} = H_1 l_1,$$

где l_1 находят из чертежа, см. пример 3-7, а H_1 — из кривых намагничивания (рис. 3-27), для чего предварительно находят:

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1}.$$

Напряженность поля в воздухе и неферромагнитном участке

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} \approx 0{,}8 \cdot 10^6 B_0, \quad (3\text{-}31)$$

где H_0 получается в амперах на метр, если B_0 выражена в теслах, или $H_0 = 0{,}8\ B_0$, если H_0 выражено в амперах на сантиметр, а B_0 — в гауссах.

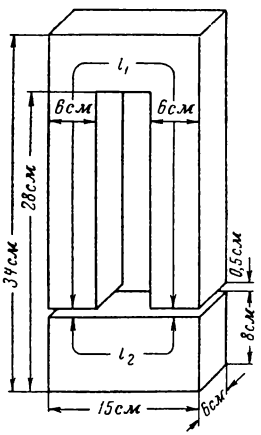


Рис. 3-29. К примеру 3-7.

Пример 3-7. Определить число витков обмотки, которую нужно наложить на сердечник (рис. 3-29), если необходим магнитный поток $470 \cdot 10^{-5}$ *вб* при токе в обмотке 10 *а*. Верхняя часть сердечника изготовлена из электротехнической стали, а нижняя часть из литой стали.

Разобьем магнитную цепь на три участка; первый — из электротехнической стали имеет длину $l_1 = 56$ *см*, сечение $S_1 = 36$ *см*^{2}; второй — из литой стали $l_2 = 17$ *см* и $S_2 = 48$ *см*^{2}; третий участок — воздушный зазор $l_0 = 0{,}5 \cdot 2 = 1$ *см* и сечение $S_0 = 36$ *см*^{2}.

Магнитная индукция на первом участке

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{470 \cdot 10^{-5}}{36 \cdot 10^{-4}} = 1{,}3\ тл.$$

По кривой намагничивания для электротехнической стали (Э330, рис. 3-27) индукции 1,3 *тл* соответствует напряженность поля 750 *а/м*.

Магнитное напряжение на первом участке

$$U_{м1} = H_1 l_1 = 750 \cdot 0{,}56 = 420\ а.$$

Аналогично найдем для второго участка

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{470 \cdot 10^{-5}}{48 \cdot 10^{-4}} = 0{,}98 \ тл.$$

Напряженность поля для второго участка (рис. 3-27):

$$H_2 = 400 \ а/м.$$

Магнитное напряжение на втором участке

$$U_{м2} = H_2 l_2 = 400 \cdot 0{,}17 = 68 \ а.$$

Для третьего участка — воздушного зазора

$$B_0 = \frac{\Phi}{S_0} = \frac{470 \cdot 10^{-5}}{36 \cdot 10^{-4}} = 1{,}3 \ тл.$$

Напряженность поля

$$H_0 = 0{,}8 \cdot 10^6 B_0 = 0{,}8 \cdot 10^6 \cdot 1{,}3 = 1{,}04 \cdot 10^6 \ а/м.$$

Магнитное напряжение

$$U_{м0} = H_0 l_0 = 1{,}04 \cdot 10^6 \cdot 0{,}01 = 10\,400 \ а.$$

Магнитодвижущая сила

$$F = U_{м1} + U_{м2} + U_{м0} = 420 + 68 + 10\,400 = 10\,888 \ а.$$

Число витков обмотки

$$w = \frac{F}{I} = \frac{10\,888}{10} = 1\,089 \text{ витков}.$$

3-15. ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ

Если на геометрической оси катушки с током, вблизи нее, расположить стальной сердечник (рис. 3-30), то он намагнитится и под действием электромагнитных сил будет стремиться занять положение в середине катушки, при котором магнитное поле будет наибольшим.

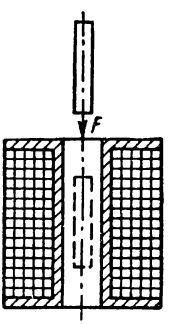


Рис. 3-30. Катушка с стальным сердечником.

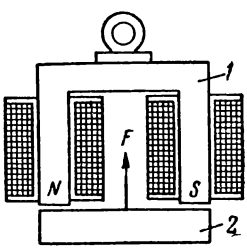


Рис. 3-31. Электромагнит.

Электромагнитом называется устройство, состоящее из магнитопровода и намагничивающей катушки (рис. 3-31). Одна подвижная часть магнитопровода — якорь *2*, притягивается к другой основной части, сердечнику *1*, с силой

$$F = 4B^2S, \tag{3-32}$$

где F — сила, *кГ*;

B — магнитная индукция, *тл*;

S — площадь сечения полюсов, *см*^{2}.

Силу электромагнита можно регулировать, изменяя намагничивающий ток, если магнитопровод работает в ненасыщенной части кривой намагничивания.

Электромагниты широко применяются в технике, например для крепления стальных деталей, в тормозных устройствах, в автоматах, реле и т. д.

Пример 3-8. Определить силу притяжения электромагнита, если индукция равна 1,2 *тл*, а сечение полюсов 1 000 *см*^{2}:

$$F = 4B^2S = 4 \cdot 1{,}2^2 \cdot 1\,000 = 5\,760 \text{ кГ}.$$

3-16. ИНДУКТИВНОСТЬ. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА САМОИНДУКЦИИ

Всякий контур электрической цепи с током, например каждый виток катушки, пронизывается собственным магнитным потоком, алгебраическая сумма которых называется потокосцеплением самоиндукции Ψ_L катушки. Величина, равная отношению потокосцепления самоиндукции к току, составляет индуктивность контура или катушки

$$L = \frac{\Psi_L}{I}. \tag{3-33}$$

При неизменной магнитной проницаемости среды поток и потокосцепления самоиндукции пропорциональны току и, следовательно, индуктивность катушки будет постоянной.

Индуктивность зависит от формы и размеров катушки (контура), числа витков ее и магнитной проницаемости среды (сердечника катушки).

Единица измерения индуктивности

$$[L] = \left[\frac{\Psi_L}{I}\right] = \frac{вб}{а} = \frac{в \cdot сек}{а} = ом \cdot сек = гн.$$

Ом-секунда называется генри. Генри очень крупная единица, поэтому часто пользуются более мелкими единицами: миллигенри $= 1 \cdot 10^{-3}$ *гн* и микрогенри $= 1 \cdot 10^{-6}$ *гн*.

Магнитный поток кольцевой катушки (3-19):

$$\Phi = BS = \mu_a \frac{Iw}{l} S,$$

а потокосцепление ее (3-27):

$$\Psi_L = w\Phi = \mu_a \frac{Iw^2}{l} S.$$

Таким образом, индуктивность кольцевой катушки

$$L = \frac{\Psi_L}{I} = \mu_a \frac{w^2 S}{l}. \qquad (3\text{-}34)$$

Пример 3-9. Определить индуктивность длинной катушки без сердечника. Длина катушки 25 *см*, диаметр 5 *см*, число витков 1 000.

Индуктивность катушки

$$L = \mu_0 \frac{w^2 S}{l} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{10^6 \cdot \pi \cdot 5^2 \cdot 10^{-4}}{0{,}25 \cdot 4} = 39{,}2 \cdot 10^{-5} \text{ гн}.$$

Любое изменение тока в контуре, например при изменении нагрузки, включении или выключении цепи, вызывает изменение потокосцепления самоиндукции, а это является причиной наведения э. д. с. Явление возникновения э. д. с. в контуре вследствие изменения тока в этом же контуре называется самоиндукцией, а индуктированная э. д. с. — электродвижущей силой самоиндукции.

Электродвижущая сила самоиндукции определяется, как и всякая наведенная э. д. с., по формуле (3-28):

$$e_L = -\frac{d\Psi_L}{dt}$$

или, учитывая выражение

$$\Psi_L = LI,$$

по формуле

$$e_L = -L\frac{dI}{dt}, \qquad (3\text{-}35)$$

откуда следует, что э. д. с. самоиндукции пропорциональна индуктивности L и скорости изменения тока в контуре.

Направление э. д. с. самоиндукции определяется по закону Ленца: при уменьшении тока в цепи $\left(\frac{di}{dt} < 0\right)$ э. д. с.

положительна и направлена одинаково с током, при увеличении тока $\left(\frac{di}{dt} > 0\right)$ э.д.с. отрицательна и направлена встречно по отношению к току.

Пример 3-10. Определить э. д. с. самоиндукции, если в катушке с индуктивностью $4 \cdot 10^{-6}$ *гн* ток уменьшается со скоростью 800 *а/сек*.

Так как

$$\frac{di}{dt} = 800 \ а/сек,$$

то э. д. с. самоиндукции

$$e_L = -L\frac{di}{dt} = 4 \cdot 10^{-6} \cdot 800 = 3{,}2 \ мв.$$

3-17. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Если ток i в цепи, обладающей сопротивлением r и индуктивностью L, увеличивается пропорционально времени t, то

$$i = kt,$$

где k — коэффициент пропорциональности.

При этом в течение всего времени нарастания тока будет наводиться постоянная э. д. с.

$$e = -L\frac{di}{dt} = -Lk,$$

так как $\frac{di}{dt} = k$.

Обозначив U — приложенное к зажимам цепи напряжение, согласно второму правилу Кирхгофа можно написать:

$$U + e_L = ir,$$

откуда напряжение на зажимах цепи

$$U = ir - e_L = ir + Lk. \qquad (3\text{-}36)$$

Умножив обе части последнего уравнения на i, получим:

$$Ui = i^2r + Lki = i^2r + Lk^2t = P_г + P_м; \qquad (3\text{-}37)$$

левая часть уравнения выражает мощность, получаемую цепью от источника питания; первое слагаемое правой части $P_т = i^2r$ — тепловую мощность, характеризующую скорость преобразования электрической энергии в тепло-

вую; второе слагаемое $P_м = Lk^2t = \frac{\Psi i}{t}$ — мощность, характеризующую скорость преобразования электрической энергии в энергию магнитного поля.

График, выражающий зависимость $P_м = f(t)$, это прямая линия, проходящая через начало координат (рис. 3-32).

За время dt в магнитном поле цепи накапливается энергия

$$dW_м = P_м dt,$$

которая изображена на рис. 3-32 заштрихованной площадкой. Количество энергии, накопленное в магнитном поле цепи за время t изменения тока от нуля до i, изобразится суммой таких площадок, которая равна площади треугольника $OAБ$. Таким образом, энергия, накопленная в магнитном поле,

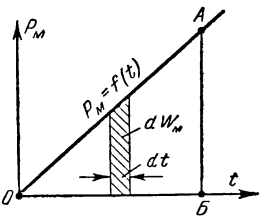


Рис. 3-32. График мощности в зависимости от времени.

$$W_м = \frac{1}{2} P_м t = \frac{L}{2} (kt)^2 = \frac{Li^2}{2}. \quad (3\text{-}38)$$

При включении цепи, обладающей сопротивлением и индуктивностью, на постоянное напряжение ток в ней устанавливается не сразу, а от нуля постепенно увеличивается до своего конечного значения $I = U/r$. Одновременно с возрастанием тока в окружающем цепь пространстве создается магнитное поле и в нем, за счет источника, запасается энергия $\frac{1}{2} Li^2$, а в цепи изменяющееся поле индуктирует э. д. с. самоиндукции, которая и является как бы регулятором тока.

Явление самоиндукции можно сравнить с инерцией тела. Когда тело приходит в движение, оно не мгновенно получает предельную скорость. Скорость постепенно увеличивается от нуля, причем это увеличение скорости связано с затратой энергии на преодоление инерции.

При размыкании цепи ток не исчезает мгновенно, а спадает постепенно, так как уменьшающееся магнитное поле будет индуктировать э. д. с. самоиндукции, совпадающую по направлению с током и ток будет поддерживаться за счет энергии магнитного поля, накопленной цепью при ее включении.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

КОНДЕНСАТОРЫ. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

4-1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ. КОНДЕНСАТОРЫ

Два проводника любой формы, разделенные диэлектриком, образуют электрический конденсатор. Проводники конденсатора часто называются электродами или обкладками конденсатора.

Примером конденсатора могут служить два провода электрической сети, две жилы кабеля, жила кабеля — броня, провод — земля, проходной изолятор (предназначенный для изоляции провода при проходе его через стену или стенку металлического кожуха). Широко применяются плоские конденсаторы различного устройства, образуемые двумя параллельно расположенными металлическими, изолированными друг от друга пластинами.

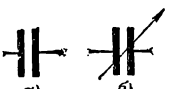


Рис. 4-1. Условные знаки конденсаторов

а — с постоянной емкостью; *б* — с переменной емкостью.

Условный знак конденсаторов показан на рис. 4-1.

Конденсаторы обладают свойством накапливать и удерживать на своих обкладках равные по величине и разные по знаку электрические заряды. Напряжение U между обкладками пропорционально величине электрического заряда Q на одной из обкладок.

Величина, определяемая отношением величины заряда одной из обкладок к напряжению между ними, называется емкостью конденсатора и является одним из его параметров. Таким образом, емкость

$$C = \frac{Q}{U}. \qquad (4\text{-}1)$$

В системе СИ единицей измерения емкости служит фарада — емкость конденсатора, заряд которого равен 1 *к*, а напряжение на зажимах равно 1 *в*, т. е.

$$1ф = \frac{1к}{1в}.$$

Фарада крупная единица, поэтому чаще пользуются микрофарадой (1 *мкф* $= 10^{-6}$ *ф*), или пикофарадой ($1пф = 10^{-12}$ *ф*).

Емкость конденсатора зависит от формы и размеров его электродов, их взаимного расположения и свойств диэлектрика, разделяющего электроды.

Например, емкость плоского конденсатора (рис. 4-2):

$$C = \varepsilon_a \frac{S}{d}, \tag{4-2}$$

где S — поверхность каждого из электродов, $м^2$;
d — расстояние между электродами, $м$;
ε_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость.

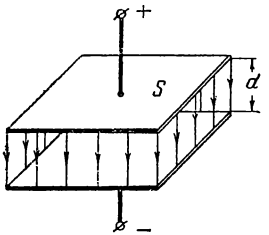


Рис. 4-2. Плоский конденсатор.

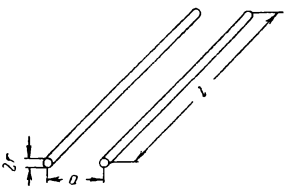


Рис. 4-3. Два параллельных цилиндрических провода.

Емкость двух параллельно расположенных цилиндрических проводов (рис. 4-3):

$$C = \varepsilon \frac{\pi l}{\ln \frac{a}{r}}, \tag{4-3}$$

где l — длина провода;
a — расстояние между осями проводов;
r — радиус провода.

Абсолютная диэлектрическая проницаемость характеризует свойство диэлектрика. Из формулы (4-2) следует, что

$$\varepsilon_a = \frac{Cd}{S},$$

откуда единица измерения

$$[\varepsilon_a] = \left[\frac{Cd}{S}\right] = \frac{ф \cdot м}{м^2} = \frac{ф}{м};$$

таким образом, абсолютная диэлектрическая проницаемость измеряется в фарадах на метр.

Абсолютная диэлектрическая проницаемость различных диэлектриков различна. Абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, называемая электрической постоянной в системе СИ, выражается

$$\varepsilon_0 \approx \frac{1}{36 \cdot 10^9 \cdot \pi} = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \textit{ф/м}. \qquad (4\text{-}4)$$

Абсолютная диэлектрическая проницаемость различных веществ записывается как произведение электрической постоянной ε_0 и диэлектрической проницаемости ε; таким образом,

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon.$$

Диэлектрическая проницаемость ε — отвлеченное число, показывающее, во сколько раз абсолютная диэлектрическая проницаемость данного вещества больше электрической постоянной. Диэлектрическая проницаемость для воздуха равна 1, для минерального масла — 2,2, слюды — 6, бумаги — 4,3.

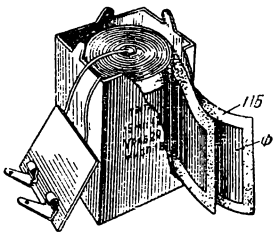


Рис. 4-4. Бумажный конденсатор.

Ф — фольга; *п. б.* — парафинированная бумага.

Наша промышленность выпускает конденсаторы различной емкости (1 *пф* — 10 000 *мф*), на различные номинальные напряжения до 100 *кв*, различного устройства и назначения.

Для цепей постоянного и переменного тока применяются бумажные, слюдяные, керамические конденсаторы, а электролитические применяются только в цепях постоянного тока.

Бумажные конденсаторы (рис. 4-4) состоят из двух длинных лент фольги, изолированных лентами парафинированной бумаги.

У электролитического конденсатора диэлектриком служит очень тонкий слой окиси на поверхности алюминиевой фольги одной из обкладок конденсатора. Второй обкладкой является бумага или ткань, пропитанная густым раствором электролита.

4-2. СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

При отсутствии конденсатора нужной емкости или на нужное номинальное напряжение его можно заменить несколькими конденсаторами с другими параметрами.

Конденсаторы соединяются последовательно, параллельно или смешанно.

При последовательном соединении (рис. 4-5) на электродах всех конденсаторов будут одинаковые по величине заряды, так как от источника энергии заряды поступают только на внешние электроды, а на врутренних электродах они получаются только за счет разделения зарядов, ранее нейтрализовавших друг друга.

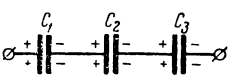


Рис. 4-5. Последовательное соединение конденсаторов.

Обозначив заряд каждого из электродов конденсатора через Q, можно написать:

$$U_1 = \frac{Q}{C_1} \quad \text{и} \quad U_2 = \frac{Q}{C_2};$$

таким образом, при различных значениях емкостей напряжения на них будут различны.

Выражая напряжение на зажимах цепи

$$U = U_1 + U_2$$

через отношение зарядов к емкостям конденсаторов, получим:

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2},$$

или, сокращая на Q, напишем:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}, \qquad (4\text{-}5)$$

откуда общая или эквивалентная емкость двух последовательно соединенных конденсаторов

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \qquad (4\text{-}6)$$

При параллельном соединении конденсаторов (рис. 4-6) напряжения на всех конденсаторах одинаковы, а заряды в общем случае имеют разные значения

$$Q_1 = C_1 U \text{ и } Q_2 = C_2 U.$$

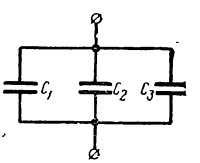


Рис. 4-6. Параллельное соединение конденсаторов.

Заряд, полученный всеми параллельно соединенными конденсаторами, равен сумме зарядов отдельных конденсаторов, т. е.

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

откуда общая или эквивалентная емкость

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q_1 + Q_2}{U} = C_1 + C_2, \qquad (4\text{-}7)$$

т. е. равна сумме емкостей отдельных конденсаторов.

При другом числе последовательно или параллельно соединенных конденсаторов, пользуясь формулами (4-5) и (4-7), нетрудно определить эквивалентные емкости.

Пример 4-1. Определить общую или эквивалентную емкость двух конденсаторов при последовательном и параллельном соединении их: $C_1 = 1$ *мкф*; $C_2 = 3$ *мкф*.

Эквивалентная емкость при последовательном соединении конденсаторов

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{1 \cdot 3}{1 + 3} = 0{,}75 \text{ мкф}.$$

Эквивалентная емкость при параллельном соединении конденсаторов

$$C = C_1 + C_2 = 1 + 3 = 4 \text{ мкф}.$$

4-3. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

При включении цепи, состоящей из сопротивления r и емкости C (рис. 4-7), на постоянное напряжение U в цепи возникает ток и происходит зарядка конденсатора.

Напряжение на зажимах цепи в каждый момент времени будет состоять из двух слагающих

$$U = u_r + u_C,$$

где $u_r = ir$ — напряжение на сопротивлении r;

$u_C = \frac{q}{C}$ — напряжение на обкладках конденсатора.

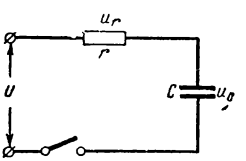


Рис. 4-7. Цепь с сопротивлением и емкостью.

Умножив написанное уравнение на $i\,dt$, получим

$$Ui\,dt = i^2 r\,dt + u_C i\,dt = i^2 r\,dt + u_C C\,du_C.$$

Левая часть уравнения представляет собой энергию, получаемую цепью за время dt, от источника питания. Первая слагающая правой части $i^2 r\,dt$ — энергия, переходящая за время dt в тепло в сопротивлении r, а вторая слагающая

$$dW_C = u_C C\,du_C$$

представляет собой энергию, запасаемую в электрическом поле при возрастании напряжения на конденсаторе на величину du_C. Так как произведение $u_C C = q$, то

$$dW_C = q\,du_C.$$

Заряд конденсатора q растет пропорционально напряжению и графически выражается прямой, проходящей через начало координат (рис. 4-8). Энергия, полученная конденсатором при возрастании напряжения на его зажимах на du_C, выразится заштрихованной площадкой (рис. 4-8). Вся энергия, накопленная конденсатором в его электрическом поле при возрастании напряжения от нуля до u_C, выразится суммой таких площадок, т. е. площадью треугольника OAB. Таким образом, энергия электрического поля

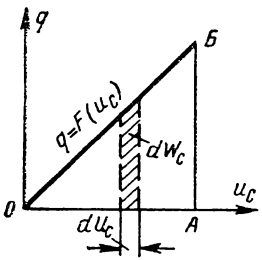


Рис. 4-8. График заряда конденсатора $q = f(u_C)$.

$$W_C = \frac{1}{2} q u_C = \frac{C u_C^2}{2}. \qquad (4\text{-}8)$$

Энергия, накопленная в электрическом поле конденсатора при его включении, выделяется при распаде электрического поля.

Пример 4-2. Определить энергию, запасенную в электрическом поле конденсатора емкостью 50 *мкф*, если напряжение на конденсаторе 300 *в*.

Энергия электрического поля

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{50}{10^6}\,\frac{300^2}{2} = 2{,}25 \ \textit{дж}.$$

4-4. ДИЭЛЕКТРИК В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Тела, в каждой единице объема которых число свободных электронов или ионов ничтожно, обладают ничтожной проводимостью и носят название непроводников: изоляторов или диэлектриков.

На рис. 4-9, *а* лист диэлектрика *1* зажат между двумя металлическими электродами *2* и *3*, к которым приложено напряжение U. Под действием сил поля от электрода *2* к электроду *3* проходит ничтожный ток, частично по диэлектрику I_v и частично по его поверхности I_S. Первый из

них называется объемным, второй — поверхностным.

Объемный ток обусловлен объемным сопротивлением диэлектрика r_v, зависящим от его свойств и размеров.

Поверхностный — обусловлен поверхностным сопротивлением диэлектрика r_S, зависящим не только от свойств диэлектрика и его размеров, но и от условий, в которых находится диэлектрик, например влажности.

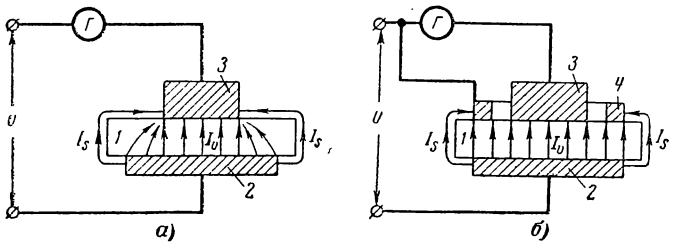


Рис. 4-9. Токи в диэлектрике.

I_v — объемный; I_S — поверхностный; *а* — гальванометр измеряет I_v и I_S; *б* — гальванометр измеряет только I_v.

Объемный ток

$$I_v = \frac{U}{r_v} = \frac{U}{\rho_v \frac{l}{S}}. \qquad (4\text{-}9)$$

Под удельным объемным сопротивлением ρ_v понимают величину, численно равную сопротивлению диэлектрика сечением 1 $см^2$ и длиной 1 *см*. Единицей объемного удельного сопротивления служит *ом-сантиметр*, что следует из выражения

$$[\rho_v] = \left[\frac{r_v S}{l}\right] = \frac{ом \cdot см^2}{см} = ом \cdot см.$$

Поверхностный ток

$$I_S = \frac{U}{r_S} = \frac{U}{\rho_S \frac{l}{d}}. \qquad (4\text{-}10)$$

Под удельным поверхностным сопротивлением диэлектрика понимают величину, численно равную сопротивлению поверхности шириной $d =$ 1 *см* и длиной $l = 1$ *см*. Единицей удельного поверхност-

ного сопротивления служит ом, что вытекает из выражения

$$[\rho_S] = \left[\frac{r_S d}{l}\right] = \frac{ом \cdot см}{см} = ом.$$

На рис. 4-9, *б* показан тот же лист диэлектрика с той лишь разницей, что верхний электрод — диск — окружен кольцевым электродом *4*. Вследствие этого между электродами *2* и *3* проходит только объемный ток, который измеряется гальванометром. Измерив напряжение, зная сечение верхнего электрода и толщину листа диэлектрика, можно по приведенной схеме определить сначала объемное сопротивление $r_v = U/I_v$, а затем и объемное удельное сопротивление по формуле (4-9).

Удельное объемное сопротивление диэлектрика является одним из его параметров.

Пример 4-3. Определить объемное удельное сопротивление электрокартона (рис. 4-9, *б*), если $U = 500$ *в*; ток $I_v = 2 \cdot 10^{-8}$ *а*, $S = 100$ *см*^{2}, толщина $l = 1$ *см*.

Удельное объемное сопротивление

$$\rho_v = r_v \frac{S}{l} = \frac{U}{I}\frac{S}{l} = \frac{500 \cdot 100}{2 \cdot 10^{-8}} = 2{,}5 \cdot 10^{12}\ ом \cdot см.$$

При внесении диэлектрика в электрическое поле под действием сил поля орбиты электронов смещаются в направлении, противоположном полю, вследствие чего ядра атомов оказываются уже не в центре электронных орбит, а на некотором расстоянии от них (рис. 4-10). При исчезновении поля исчезает и смещение. Явление смещения называется поляризацией диэлектрика.

Рис. 4-10. Атом диэлектрика.
а — неполяризованный; *б* — поляризованный.

Поляризованные молекулы создают свое электрическое поле, направленное противоположно основному, в результате происходит ослабление основного поля. Способность диэлектрика поляризоваться под действием электрического поля оценивается диэлектрической проницаемостью, которая показывает, во сколько раз ослабляется основное поле вследствие поляризации.

В переменном электрическом поле смещение в диэлектрике будет переменным. Этот процесс приводит к усиле-

нию движения частиц материи и, следовательно, к нагреванию диэлектрика. Чем больше частота изменений электрического поля, тем сильнее нагревается диэлектрик. Это явление используется для нагрева влажных диэлектриков с целью их сушки или получения химических реакций, требующих повышенной температуры. Мощность, идущая на нагрев диэлектрика, обусловленная периодическим изменением смещения, отнесенная к единице объема, называется удельными диэлектрическими потерями.

Диэлектрическая проницаемость и удельные диэлектрические потери являются важными параметрами диэлектрика.

Повышая напряженность электрического поля, в котором расположен диэлектрик, можно достигнуть такого значения ее, при котором произойдет пробой диэлектрика, т. е. местное разрушение его. Эта напряженность поля называется пробивной напряженностью или электрической прочностью диэлектрика, а напряжение, при котором происходит пробой, пробивным напряжением.

Характер пробоя может быть различным.

При электрическом пробое немногие, в начальный момент, свободные электроны в диэлектрике под действием электрического поля достигают определенной критической скорости, достаточной для отщепления новых электронов от нейтральных атомов, и молекул диэлектрика — возникает ударная ионизация, приводящая к пробою.

При тепловом пробое происходит разогрев диэлектрика в электрическом поле до значений, при которых происходит термическое повреждение или разрушение, например растрескивание, обугливание и т. д. Причиной разогрева могут быть диэлектрические потери или увеличение электропроводности диэлектрика и значительное не пропорциональное возрастание объемного тока при повышении напряжения вследствие отрицательного температурного коэффициента сопротивления диэлектрика.

Прочность диэлектрика не строго постоянна. Она зависит от ряда условий: рода напряжения, скорости изменения его, продолжительности действия напряжения, формы электрического поля (формы электродов), толщины диэлектрика, его температуры, влажности, а у газов и от давления.

Для надежности работы электроустановки необходимо, чтобы все диэлектрики ее работали при напряженностях,

не превосходящих допустимые напряженности, которые должны быть в несколько раз меньше пробивной. Электрическая прочность некоторых диэлектриков приведена в § 4-7.

Пример 4-4. Лист электрокартона толщиной 0,2 *см* зажат между двумя плоскими металлическими электродами. Определить допускаемое и пробивное напряжение. Допускаемое напряжение должно быть в 3 раза меньше пробивного.

По таблице находим пробивную напряженность для электрокартона $\mathscr{E}_{пр} = 100$ *кв/см*.

Пробивное напряжение

$$U_{пр} = \mathscr{E}_{пр} d = 100 \cdot 0{,}2 = 20 \text{ кв}.$$

Допустимое напряжение

$$U_{доп} = \frac{U_{пр}}{3} = \frac{20}{3} \approx 7 \text{ кв}.$$

4-5. ГАЗ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В нормальных условиях газ является диэлектриком, так как число свободных электронов и ионов в нем ничтожно.

Воздействие на газ рентгеновских, радиоактивных, космических и других лучей, электрического поля, высокой температуры и других агентов вызывает ионизацию газа. Например, в электрическом поле столкновение (соударение) электрона с нейтральным атомом или молекулой газа может привести к расщеплению нейтрального атома газа на электрон и положительный ион. При этом соударении часть энергии движущегося электрона передается атому газа. Наименьшее количество энергии, необходимое для ионизации атома, определяется потенциалом ионизации. Отщепленный от атома электрон может остаться свободным или присоединиться к нейтральному атому, образуя отрицательный ион.

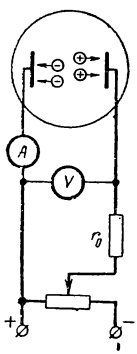


Рис. 4-11. Схема получения характеристики газового промежутка.

Обратный процесс воссоединения ионов и электронов в нейтральные атомы, называемый деионизацией или рекомбинацией, происходит одновременно с ионизацией газа. Таким образом, при непрерывном действии ионизатора степень ионизации газа остается примерно неизменной.

Если к двум металлическим электродам (рис. 4-11), расположенным в ионизированном газе, приложить по-

стоянное напряжение, то электрическое поле вызовет перемещение положительных ионов в направлении поля, а электронов и отрицательных ионов — в противоположном направлении, т. е. в газовом промежутке будет электрический ток.

Несамостоятельной проводимостью называется проводимость газа, вызванная действием постороннего ионизатора, наблюдаемая только в течение времени его действия.

При неизменной ионизации постоянным ионизатором повышение напряжения между электродами сначала вызывает пропорциональное увеличение тока (рис. 4-12), затем наблюдается замедление его роста и далее прекращение роста. Ток достигает значения насыщения, при котором не происходит деионизации, а все ионы и электроны, возникающие в процессе ионизации, достигают электродов.

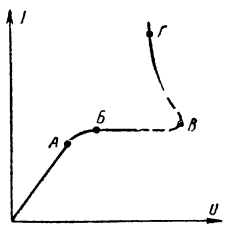


Рис. 4-12. Вольт-амперная характеристика газового промежутка.

При увеличении напряжения можно получить между двумя электродами напряженность поля, при которой кинетическая энергия электронов $\frac{mv^2}{2}$ будет достаточной для ионизации нейтральных атомов, т. е. ионизации толчком или ударом. Отщепившиеся электроны, получив достаточное ускорение, ионизируют новые нейтральные атомы и т. д. Процесс образования ионов и электронов развивается лавинообразно и сопровождается резким увеличением тока (рис. 4-12, участок *ВГ*) до значения, определяемого сопротивлением r_0 (рис. 4-11). Напряжение на электродах при этом уменьшается.

Пространство между электродами при разряде заполняется ионизированным газом, в котором содержится примерно одинаковое количество электронов и положительных ионов. Такая среда называется электронно-ионной плазмой или просто плазмой. Плазма обладает хорошей электропроводностью, близкой к электропроводности металлов.

У части электронов кинетическая энергия недостаточна для ионизации атомов газа. В этом случае энергия, полученная атомом при соударении, только возбуждает атом.

Возбужденный атом вскоре отдает избыточную энергию в виде светового излучения, воспринимаемого глазом как свечение газа.

Самостоятельный разряд в газе может быть вызван электрическим полем достаточно высокой напряженности. При некоторой напряженности, а следовательно, и напряжении, называемом напряжением зажигания, происходит резкое увеличение тока (рис. 4-12, участок *ВГ*) и начинается свечение газа.

Различают несколько стадий самостоятельного разряда в газах: темный, тлеющий, искровой и дуговой.

Темный разряд возникает, если напряженность поля в какой-либо части его достигает критического значения для данного газа, например на заостренных частях или у поверхности провода малого диаметра. Иногда этот разряд сопровождается свечением — короной и характерным шипящим звуком.

Тлеющий разряд, как переходящий из темного, получается в приборах при низких давлениях. Он характерен светящимся слоем газа, прилегающего к аноду,— анодное свечение. В длинных стеклянных трубках анодное свечение занимает большую часть трубки и имеет различный цвет в зависимости от газа, например неон дает красный цвет. Такие трубки применяются для рекламного освещения.

Лампы с тлеющим разрядом применяются как индикаторы напряжения. В баллоне, заполненном неоном или аргоном, расположены два металлических электрода. Зажигание лампы происходит при определенном напряжении. Мощность лампы составляет доли ватта.

Искровой разряд развивается из темного при повышении напряжения, а следовательно, и напряженности поля и распространения ионизации на всю длину участка между электродами. Искровой разряд проходит по отдельным каналам — путям наименьшего сопротивления. Лавина электронов, движущихся в искровом канале, вызывает резкое повышение температуры и давления, вследствие чего искровой разряд сопровождается характерным треском. Молния представляет собой гигантский искровой разряд.

Искровой разряд вызывает электроэрозию, т. е. вырывание частиц вещества анода. Это явление используется для электроискровой обработки металлов.

Дуговой разряд можно получить и без предварительной стадии, например, между двумя угольными электродами, соединенными с источником питания через ограничивающее сопротивление. Для получения дуги концы углей сближают до соприкосновения. Возникающий ток нагревает до высокой температуры сближенные концы. При раздвигании углей промежуток между ними ионизируется электронами и заполняется плазмой, замыкающей цепь тока. Происходит дальнейший разогрев электродов и в особенности анода, бомбардируемого электронами. Температура анода и плазмы превышает 4 000° С, излучается мощный световой поток.

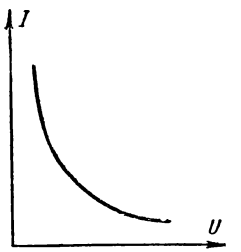


Рис. 4-13. Вольт-амперная характеристика дуги.

Плазма имеет большую проводимость, поэтому и при малых напряжениях 15—30 *в* в цепи проходит большой ток.

При увеличении тока температура и проводимость плазмы увеличиваются, а напряжение на дуге падает. Вольт-амперная характеристика дуги имеет падающий характер (рис. 4-13).

Искровой и дуговой разряды возникают при размыкании электрических цепей, при выключении приемников энергии.

Дуговой разряд был открыт в 1802 г. академиком В. В. Петровым. Им же была исследована возможность практического применения ее для освещения и других целей.

Электрическая дуга была применена для освещения Н. Н. Яблочковым в 1876 г.

Электрическая дуговая сварка металлов, широко применяемая в нашей стране, является одним из прогрессивных технологических процессов.

4-6. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

Всякая электрическая цепь должна иметь не только токопровод, т. е. путь, по которому проходит электрический ток, но и устройство, делающее невозможным прохождение тока по каким-либо побочным путям, вне этого токопровода. Таким образом, токопровод на всем протяже-

нии должен быть окружен электрической изоляцией, которая отделяет токопровод от окружающей среды и разделяет друг от друга участки токопровода, находящиеся под разными потенциалами.

Кроме того, изоляция должна оградить людей от прикосновения к участкам токопровода, находящимся под потенциалом, отличным от потенциала земли.

В конденсаторах и ряде устройств, например в кабелях, изоляция используется в качестве рабочих диэлектриков, влияющих на их емкость, параметры и свойства.

Правильный выбор изоляции, рациональная конструкция ее и контроль за состоянием изоляции обеспечивают безаварийную работу электроустановок. При этом необходимо помнить, что изоляция легче подвергается изменению, легче повреждается, чем токопровод.

Устройство и конструкция изоляторов и изоляции отдельных элементов электротехнических устройств и контроль за их состоянием рассмотрены в соответствующих главах книги.

Роль электроизоляции, ее стоимость повышаются с увеличением рабочего напряжения электроустановки.

Получение и рациональное применение новых изоляционных материалов высокой электрической прочности, высокой теплостойкости с большой диэлектрической проницаемостью имеют очень большое технико-экономическое значение, так как дают возможность уменьшить габариты, вес и стоимость электрических машин, электроаппаратуры, электрических сетей и линий передач электроэнергии.

К электроизоляционным материалам предъявляются весьма разнообразные требования в отношении их свойств, главные из которых определяются следующими величинами:

1) электрической прочностью $\mathscr{E}_{пр}$;
2) удельным объемным сопротивлением;
3) удельным поверхностным сопротивлением;
4) диэлектрической проницаемостью ε_a или ε;
5) диэлектрическими потерями.

Кроме того, большое значение имеют механические, термические и другие физические и химические свойства.

В соответствии с большим разнообразием требований в электротехнике находят применение очень большое число самых различных электроизоляционных материалов.

4-7. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Электроизоляционные материалы можно разделить на группы по разным признакам, например: 1) по их агрегатному состоянию на газообразные, жидкие, твердые; 2) по их химической природе на органические и неорганические; 3) на классы по их теплостойкости (§ 14-2) и т. д.

а) Газообразные диэлектрики

Воздух является естественным изолятором. В отдельных частях установок, например в воздушных линиях электропередач между опорами, воздух является единственной изоляцией между голыми проводами.

Электрическая прочность воздуха, как и других газов, зависит от температуры, давления и ряда других обстоятельств. При нормальной температуре (+20° С) и нормальном давлении воздух обладает электрической прочностью 30 *кв/см*, меньшей, чем большинство жидких и твердых диэлектриков. Вследствие этого иногда наблюдается пробой воздушного промежутка непосредственно у поверхности твердого диэлектрика (изолятора), который называется поверхностным разрядом. Поверхностный разряд предпочтительней, чем пробой изолятора, так как прочность воздуха восстанавливается, а пробитый изолятор выходит из строя и требует замены.

Из других газов находят применение водород, углекислый газ, азот и инертные газы: аргон и неон — два последних для заполнения колб электроламп.

Водород применяется вместо воздуха для охлаждения крупных электрических машин, так как применение его дает значительное улучшение охлаждения вследствие его большой теплопроводности и теплоемкости.

б) Жидкие диэлектрики

К жидким диэлектрикам относятся: минеральные масла, синтетические жидкости, смолы, лаки.

Минеральные масла являются продуктами перегонки нефти. Они представляют собой смеси жидких углеводородов. Основное их применение: масляные трансформаторы, масляные выключатели, силовые кабели, конденсаторы.

В трансформаторах масло служит для изоляции токоведущих частей и для охлаждения, которое осуществляется путем конвекции, т. е. переноса тепла при циркуляции масла.

В масляных выключателях масло является средой, которая способствует гашению электрической дуги при разрыве цепи.

В кабелях с рабочим напряжением до 35 *кв* масло применяется для пропитки изоляции. В кабелях с рабочим напряжением от 100 *кв* и выше маслом наполняются каналы для него, идущие вдоль всего кабеля.

Масло должно иметь высокую электрическую прочность (100—200 *кв/см*). Она резко падает при наличии в нем влаги, поэтому перед заливкой и периодически при эксплуатации масло должно высушиваться и очищаться. Диэлектрическая проницаемость масла $\varepsilon = 2 \div 2{,}3$; удельное объемное сопротивление его $\rho_v = 10^{14} \div 10^{15}$ *ом · см*.

В последнее время довольно широкое применение получили искусственные жидкие диэлектрики.

С о в о л представляет смесь молекул дифенила разной степени хлорирования. Этот синтетический жидкий диэлектрик применяется для пропитки и заполнения конденсаторов, так как его диэлектрическая проницаемость в 2 с лишним раза больше, чем у минерального масла и, следовательно, повышает емкость конденсаторов примерно в 2 раза.

Вследствие большой вязкости совол не пригоден для заполнения трансформаторов, для этой цели применяют совтол. Он представляет совол, разбавленный трихлорбензолом.

С о в т о л, так же как и совол, негорюч и залитые им трансформаторы безопасны в пожарном отношении.

С м о л ы при низких температурах — аморфные стеклообразные массы. При нагреве они размягчаются и становятся пластичными, а затем жидкими. Смолы не гигроскопичны и не растворяются в воде, но растворяются в спирте и других растворителях.

Смолы являются важнейшей составной частью многих лаков, компаундов, пластмасс, пленок. Они бывают природные и искусственные.

Природные смолы представляют собой продукт жизнедеятельности некоторых животных организмов, например шеллак, или растений — смолоносов. Наибольшее значение

имеют синтетические смолы, например полиэтилен, полихлорвинил. Полихлорвинил — полимер хлористого винила, применяется для изоляции проводов, кабелей, для защитных покрытий, для изготовления лаков.

Диэлектрическая проницаемость искусственных смол $\varepsilon = 4 \div 9$; электрическая прочность $U_{пр} = 150 \div 400$ *кв/см*; удельное объемное сопротивление $\rho_v = 10^{13} \div 10^{14}$ *ом · см*.

Л а к и представляют собой растворы пленкообразующих веществ: смол, битумов, высыхающих растительных масел, например льняного, эфиров целлюлозы. В процессе сушки происходит образование лаковой пленки.

По назначению лаки делятся на пропиточные, покровные и клеящие. Пропиточные лаки применяются для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов с тем, чтобы повысить их влагостойкость. Покровные лаки служат для получения защитных покрытий от воздействия окружающей среды. Клеящие лаки предназначены для склеивания листочков слюды друг с другом, с бумагой или тканью (миканит, микалента).

Э м а л и это лаки с введенными в них неорганическими наполнителями, повышающими твердость, механическую прочность, влагостойкость эмалевых пленок.

Э м а л ь л а к и это специальная группа лаков, предназначенная для создания тонких (0,05 *мм*) и гибких изоляционных покрытий на обмоточных проводах (провода с эмалевой изоляцией).

в) Твердые диэлектрики

Твердые диэлектрики составляют настолько многочисленную группу изоляционных материалов, что всех их рассмотреть не представляется возможным. Поэтому рассмотрим некоторые наиболее широко применяемые. Ради компактности часть сведений о них дана в табл. 4-1.

1. В о л о к н и с т ы е о р г а н и ч е с к и е м а т е р и а л ы: бумага, картон, фибра, ткани изготовляются из волокон древесины, хлопка, натурального шелка.

Они обладают гибкостью, достаточной механической прочностью и гигроскопичностью, для уменьшения которой применяется пропитка маслом или компаундом.

Б у м а г а изготовляется из древесины путем специальной обработки. Применяется кабельная, конденсаторная, пропиточная бумага для изготовления гетинакса,

намоточная для изготовления бакелитовых изделий, оклеечная для изоляции листов стали.

Таблица 4-1

Характеристики некоторых электроизоляционных материалов

Диэлектрик	$\mathscr{E}_{пр}$	ε	ρ_v
	кв/см	—	*ом · см*
Асбест	30÷60		10^8
Бумага, пропитанная маслом	100÷250	3,6	—
Гетинакс	100÷150	4÷7	10^{10}÷10^{12}
Дерево	25÷50	2÷3	10^8÷10^{11}
Лакоткань	70÷400	3÷4	10^{11}÷10^{13}
Мрамор	30÷50	7÷8	18^8÷10^{11}
Полистирол	200÷300	2,5	10^{16}÷10^{18}
Парафин	200÷250	2÷2,2	10^{16}÷10^{17}
Полихлорвинил	325	3,2	10^{13}
Полиэтилен	500	2,25	10^{14}÷10^{16}
Резина	150÷250	3÷6	10^{13}÷10^{14}
Стекло	100÷150	6÷10	10^{14}
Стекло органическое	400÷500	3	10^{14}÷10^{16}
Стеклолакоткань	300÷400	3÷4	10^{12}÷10^{14}
Слюда	500÷1000	5,4	$5 \cdot 10^{11}$
Совол		5,3	
Трансформаторное масло	50÷180	2÷2,5	$5 \cdot 10^{14}$—$5 \cdot 10^{15}$
Текстолит	10÷75	4÷8	10^{10}÷10^{13}
Фарфор	150÷200	5,5	10^{14}÷10^{15}
Эбонит	600÷800	3÷3,5	10^{15}÷10^{16}
Электрокартон	80÷120	3÷3	10^8 ÷10^{10}

Электрокартон (прессшпан) изготовляется из целлюлозы и подвергается прессованию. Электрокартон марки ЭВ предназначен для работы в воздухе, а марки ЭМ — для работы в масле.

Электрокартон широко применяется для прокладок в пазах электрических машин, каркасов обмоток трансформаторов и различных изделий.

Фибра изготовляется из пористой бумаги путем обработки ее хлористым цинком. Применяется для изготовления панелей, стоек, втулок, каркасов катушек и других электроизделий.

Гетинакс — прессованная бумага, пропитанная бакелитом, изготовляется листами толщиной от 0,2 до 50 *мм*.

Текстолит — прессованная многослойная ткань, пропитанная резольной смолой.

2. Пластмассы — материалы, состоящие из двух составных частей — связующей и наполнителя. Связующей частью служат смолы или битумы, а также стекло (в микалексе) или цемент (в асбестоцементе). Наполнитель может быть порошкообразным или волокнистым.

Для уменьшения хрупкости иногда вводят пластификаторы, а для окраски изделия — красители.

Различают пластмассы горячей и холодной прессовки. В пресс-формах пластмасса превращается в готовое изделие определенной формы.

Пластмассы широко применяются в электротехнике в качестве изоляционных и конструкционных материалов.

3. Эластомеры. Эластичность — свойство материала сильно удлиняться при растяжении и принимать прежние размеры при снятии нагрузки.

Материалы, обладающие свойствами эластичности, принято называть эластомерами.

Каучук натуральный, получаемый из растений — каучуконосов — обладает высокой эластичностью и малой проницаемостью для влаги и газов.

За последние десятилетия широкое применение получил синтетический каучук.

Резина — эластичный материал, получаемый путем обработки каучука серой. При содержании серы 1—3% получается мягкая очень эластичная резина, при содержании серы 25—50% получается твердая резина — эбонит, не обладающий эластичностью, хорошо поддающийся обработке.

Резина широко применяется в электротехнике из-за ее эластичности и высоких электрических свойств (см. табл. 4-1).

Резина с малым содержанием серы применяется для изоляции проводов и кабелей. Эбонит применяется для изолирующих деталей.

Недостатком резины является низкая нагревостойкость и неустойчивость к действию минеральных масел.

Последнее время резина с успехом заменяется пластмассами-эластомерами, например полихлорвинил, полиэтилен, более стойкими, чем резина, к действию щелочей, кислот, минеральных масел, бензина.

4. Стекло получается плавлением кремнезема (SiO_2) с окислами натрия, калия, кальция, с последующим быстрым охлаждением и обработкой для придания изделию нужной формы.

Обычное стекло обладает хрупкостью, специально изготовленные стекла, например сталинит, имеют высокую прочность.

Стекло в электротехнике применяется для изготовления изоляторов и колб ламп накаливания и электронных ламп.

Из стекла можно получить волокно и стеклопряжу, применяемую, например, для изоляции проводов, предназначенных для работы при высокой температуре.

5. Электрофарфор: коалин, огнеупорная глина, кварц, полевой шпат измельчаются, перемешиваются, подвергаются обработке, имеющей целью придать изделию нужную форму, покрываются глазурью для уменьшения гигроскопичности и обжигаются.

Фарфор имеет высокую механическую, электрическую прочность и теплостойкость. Он широко применяется для изготовления низковольтных и высоковольтных изоляторов.

6. Слюда — минерал кристаллической структуры, легко расщепляющийся на тонкие листочки. Она обладает высокой нагревостойкостью, влагостойкостью и высокими электрическими свойствами (см. табл. 4-1). Слюда находит широко применение в электротехнике и радиотехнике.

Миканит — склеенные лаком или смолой листочки слюды. Он применяется для прокладок между коллекторными пластинами, прокладок различного назначения, а также для изготовления фасонных деталей путем формовки.

7. Асбест — минерал волокнистого строения. Основное преимущество асбеста — высокая нагревостойкость до 300—400° С. Он обладает гигроскопичностью. Электроизолирующие свойства его невысоки (см. табл. 4-1). Из асбеста изготовляют пряжу, ткани, ленты, шнуры, картон.

Асбестоцемент получают холодной прессовкой массы, состоящей из асбестового волокна, цемента и воды. Он обладает высокой нагревостойкостью, механической прочностью и негорючестью.

Асбестоцемент идет на изготовление перегородок щитов, труб и фасонных деталей.

8. Мрамор — горная порода, из которой изготовляются мраморные плиты для панелей щитов и щитков.

9. Парафин — продукт переработки нефти — белое воскообразное вещество. Парафин не гигроскопичен, плавится при 55° С.

Применяется для пропитки бумаги, картона, дерева, для уменьшения гигроскопичности.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

5-1. ПЕРИОД И ЧАСТОТА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Большим преимуществом переменного тока, обеспечивающим ему повсеместное применение, является возможность просто и почти без потерь трансформировать его, т. е. возможность получать ток различного напряжения — высокого для дальних электропередач и низкого для питания потребителей.

В технике переменным током называют периодический ток, все значения которого повторяются через одинаковые промежутки времени, называемые периодом (T), при этом в течение одного полупериода ток имеет одно направление, а в течение следующего — другое, противоположное направление.

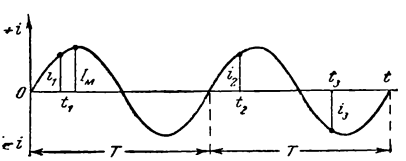


Рис. 5-1. График переменного тока.

График переменного синусоидального тока представлен на рис. 5-1; на графике по оси абсцисс отложено время, а по оси ординат — значения тока i. Ординаты, расположенные над осью абсцисс, обозначают положительное значение тока, а расположенные под осью абсцисс — отрицательное значение его.

Значение переменной величины в какой-нибудь момент времени называется мгновенным значением ее и согласно стандарту обозначается малой буквой, например, мгновенное значение тока — i, мгновенное значение напряжения — u.

Мгновенным значением тока называется отношение элементарного количества электричества dq, проходящего

через сечение проводника в течение малого времени dt, к продолжительности этого времени, т. е.

$$i = \frac{dq}{dt}. \qquad (5\text{-}1)$$

Наибольшее значение величины, имеющее место в течение периода, называется максимальным или амплитудным значением ее и согласно стандарту обозначается прописной буквой с индексом «м», например, $I_м$ — амплитудное значение тока (рис. 5-1). Совокупность изменений тока (напряжения), происходящих в течение периода, называется циклом переменного тока (напряжения).

Величина, обратная периоду, т. е. число периодов в секунду, называется частотой переменного тока, таким образом частота

$$f = \frac{1}{T}. \qquad (5\text{-}2)$$

В системе СИ единицей частоты служит герц (*гц*), численно равный одному периоду в секунду.

В СССР стандартная промышленная частота 50 *гц*. Телефонная связь работает при частоте 300—3 500 *гц* (звуковые частоты). В радиотехнике применяется частота 10^5—10^{10} *гц*.

5-2. ПОЛУЧЕНИЕ СИНУСОИДАЛЬНОЙ Э.Д.С.

В технике пользуются токами, изменяющимися по закону синуса (рис. 5-1), так как при таком изменении по тому же закону будут изменяться э. д. с., индуктированные этими токами и напряжения, что будет показано ниже.

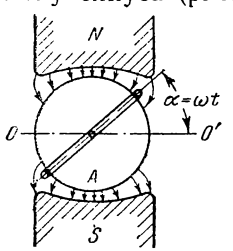


Рис. 5-2. Схематическое устройство генератора переменного тока.

На рис. 5-2 показано устройство простейшего генератора. Между полюсами электромагнита NS расположен якорь — цилиндр, набранный из листов стали, с укрепленным на его поверхности витком проволоки. Концы витка соединены с медными изолированными кольцами, укрепленными на валу якоря. На кольца наложены щетки, соединенные с внешнею цепью.

Полюсам придана такая форма, при которой воздушный зазор увеличивается от середины полюса к его краям

и магнитная индукция B в зазоре вдоль окружности якоря у его поверхности изменяется по закону синуса, т. е.

$$B = B_м \sin \alpha,$$

где $B_м$ — максимальная индукция под серединой полюса, а α — угол между нейтральной плоскостью OO', проходящей через ось якоря, и плоскостью, проведенной через ту же ось и произвольную точку на поверхности якоря.

При вращении якоря с постоянной угловой скоростью $\omega = \alpha/t$ в каждой активной стороне витка будет наводиться э. д. с.

$$e' = Blv = B_м lv \sin \alpha = B_м lv \sin \omega t.$$

Активные стороны витка соединены последовательно, поэтому э. д. с., наведенная в витке,

$$e = 2e' = 2B_м lv \sin \omega t.$$

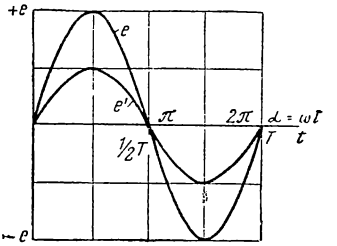


Рис. 5-3. Графики переменных э. д. с.

На рис. 5-3 приведены графики э. д. с. $e = f(t)$ и $e' = f(t)$.

Если вместо одного витка на якоре будет катушка, имеющая w витков, то э. д. с.

$$e = 2B_м lwv \sin \omega t,$$

т. е. в w раз больше.

При $\sin \omega t = 1$ э. д. с. будет иметь максимальное значение

$$E_м = 2B_м lwv \qquad (5\text{-}3)$$

и, следовательно, наведенная в катушке якоря э. д. с.

$$e = E_м \sin \omega t. \qquad (5\text{-}4)$$

Из написанного выражения следует, что в момент времени, принятый за начало отсчета $t = 0$, плоскость витка совпадает с нейтральной плоскостью, так как $\alpha = \omega t = 0$.

При постоянной скорости вращения якоря за один оборот его $\alpha = 2\pi$ происходит полный цикл изменения э. д. с., соответствующий одному периоду $t = T$, поэтому угловая скорость вращения может быть выражена:

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f. \qquad (5\text{-}5)$$

Кроме генераторов с одной парой полюсов, применяются генераторы с большим числом пар полюсов. У генератора с p парами полюсов (рис. 5-4) за один оборот его происходит p циклов изменения э. д. с., так как за один оборот каждый проводник p раз пройдет под северным и p раз — под южным полюсом.

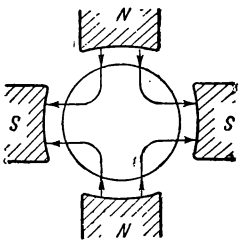


Рис. 5-4. Генератор переменного тока с двумя парами полюсов.

На рис. 5-5 приведен график $e = f(t)$ за время одного оборота якоря генератора с двумя парами полюсов.

Для получения синусоидальной э. д. с. магнитная индукция у поверхности якоря многополюсного генератора с p парами полюсов должна изменяться по закону

$$B = B_м \sin p\alpha. \qquad (5\text{-}6)$$

Произведение $p\alpha$ называется электрическим углом в отличие от геометрического угла α.

Отношение электрического угла ко времени $\frac{p\alpha}{t} = \omega$ называется электрической угловой скоростью или угловой частотой. При $t = T$ будем

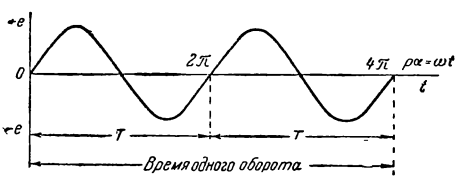


Рис. 5-5. График переменной э. д. с. генератора с двумя парами полюсов.

иметь $p\alpha = 2\pi$ и, следовательно, для многополюсного генератора угловая частота

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \qquad (5\text{-}7)$$

не зависит от числа пар полюсов генератора.

Если якорь вращается со скоростью n, т. е. совершает n оборотов в минуту, то число циклов наведенной э. д. с. в минуту будет pn, а число циклов в секунду, т. е. частота,

$$f = \frac{pn}{60}, \qquad (5\text{-}8)$$

а угловая частота

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{pn}{60}. \qquad (5\text{-}9)$$

Пример 5-1. Генератор, работающий совместно с паровой турбиной, имеет две пары полюсов ($p = 2$). Якорь его вращается со скоростью 1 500 *об/мин*. Определить частоту переменного тока

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{2 \cdot 1\,500}{60} = 50 \text{ гц}.$$

Пример 5-2. Сколько пар полюсов должен иметь генератор, работающий совместно с гидротурбиной, имеющей номинальную скорость 250 *об/мин*, если генератор работает при частоте $f = 50$ *гц*.

Согласно (5-8)

$$p = \frac{f \cdot 60}{n} = \frac{50 \cdot 60}{250} = 12 \text{ пар}.$$

5-3. СДВИГ ФАЗ

При вращении якоря с двумя укрепленными на нем одинаковыми витками *1* и *2*, сдвинутыми в пространстве (рис. 5-6), в них будут индуктироваться э. д. с. одной частоты с одинаковыми амплитудами. Но вследствие сдвига витков в пространстве э. д. с. достигают амплитудных значений не одновременно.

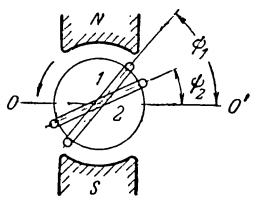


Рис. 5-6. Два витка обмотки якоря генератора.

При вращении против направления движения часовой стрелки в момент начала отсчета времени ($t = 0$) витки расположены по отношению к нейтральной плоскости OO' под углами ψ_1 и ψ_2 и наведенные в витках э. д. с. в любой момент времени t:

$$e_1 = E_м \sin(\omega t + \psi_1) \quad \text{и} \quad e_2 = E_м \sin(\omega t + \psi_2). \qquad (5\text{-}10)$$

В последних выражениях угол $(\omega t + \psi)$ называется фазным углом или фазой. Таким образом, из выражений (5-10) следует, что мгновенное значение э. д. с. определяется амплитудой $E_м$ и фазой.

В начальный момент времени $t = 0$ э. д. с., наведенные в витках:

$$e_{10} = E_м \sin \psi_1 \quad \text{и} \quad e_{20} = E_м \sin \psi_2.$$

На рис. 5-7 эти э. д. с. изображены начальными ординатами.

Электрические углы ψ_1 и ψ_2, определяющие значения э. д. с. в момент времени $t = 0$, называются начальными фазными углами или начальными фазами. Положительная начальная фаза откладывается влево от начала системы координат, отрицательная — вправо.

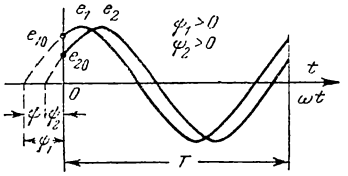


Рис. 5-7. Графики двух переменных э. д. с.

Разность начальных фаз двух синусоидальных величин называется углом сдвига фаз или сдвигом фаз

$$\psi = \psi_1 - \psi_2. \quad (5\text{-}11)$$

Разделив сдвиг фаз на угловую частоту, получим время сдвига:

$$\frac{\psi}{\omega} = \frac{\psi T}{2\pi} = t_{12},$$

т. е. время, на которое начало периода одной синусоидальной величины достигается раньше, чем у другой синусоидальной величины.

Началом периода называют момент времени, в который синусоидальная величина проходит через то нулевое значение, после которого наступают положительные значения ее.

Величина, у которой начало периода наступает раньше, чем у другой, считается опережающей, а та, у которой начало периода наступает позже — отстающей по фазе. Например, э. д. с. e_1 (рис. 5-7) опережает по фазе э. д. с e_2 на $< \psi$ или на время t_{12}, или, что тоже, э. д. с. e_2 отстает от э. д. с. e_1 на $< \psi$ или на время t_{12}.

Две синусоидальные величины, имеющие одинаковые начальные фазы, т. е. совпадающие начала периодов, называются совпадающими по фазе ($\psi = 0$).

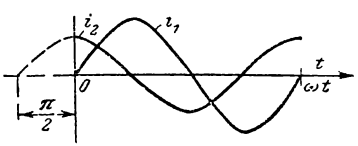


Рис. 5-8. Графики двух переменных токов.

Токи i_1 и i_2 (рис. 5-8) сдвинуты по фазе на четверть периода или на 90°. Ток i_1 имеет нулевую начальную фазу, ток i_2 — начальную фазу $\frac{\pi}{2} = 90°$, таким образом,

$$i_1 = I_{м1} \sin \omega t; \quad i_2 = I_{м2} \sin (\omega t + \pi/2).$$

Синусоида с начальной фазой $\pi/2$ это то же, что косинусоида с нулевой начальной фазой: $i_2 = I_{м2} \cos \omega t$.

Про синусоидальные величины, сдвинутые по фазе на половину периода, говорят, что одна из них изменяется в противофазе с другой.

Пример 5-3. Заданы две э. д. с.

$$e_1 = E_м \sin(\omega t + 60°); \quad e_2 = E_м \sin \omega t.$$

Частота $f = 50$ *гц*.
Определить: угол сдвига фаз e_1 и e_2, время сдвига фаз.
Выразим начальные фазы ψ_1 и ψ_2 в радианах

$$\psi_1 = \frac{60 \cdot 2\pi}{360} = \frac{\pi}{3}; \quad \psi_2 = 0.$$

Угол сдвига фаз

$$\psi = \psi_1 - \psi_2 = \frac{\pi}{3}.$$

Период

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0{,}02 \text{ } сек.$$

Время сдвига фаз e_1, e_2:

$$t_{12} = \frac{\psi}{\omega} = \frac{\pi T}{3 \cdot 2\pi} = \frac{T}{6} = 0{,}0033 \text{ } сек.$$

5-4. ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА

Синусоидальные величины изображают или синусоидами, или вращающимися векторами.

Первый способ изображения рассмотрен в § 5-1, 5-2 и 5-3. Такое изображение дает возможность найти амплитуду, начальную фазу и период, т. е. все величины, определяющие синусоидальную величину.

При изображении синусоидальной величины вращающимся вектором длина вектора в определенном масштабе представляет собой амплитуду величины; угол между вектором и положительным направлением оси абсцисс в начальный момент равен начальной фазе, а угловая скорость вращения вектора равна угловой частоте. Мгновенное значение синусоидальной величины, представленной вращающимся вектором, определяется проекцией вектора на ось ординат.

Например, для изображения э. д. с. $e = E_м \sin(\omega t + \psi)$ под углом ψ к положительному направлению оси абсцисс

(рис. 5-9) проводят вектор в выбранном масштабе, выражающий амплитуду $E_м$. При вращении вектора в положительном направлении (рис. 5-9) с угловой скоростью ω проекции его на ось ординат (ось Y) выражают для соответствующих моментов времени мгновенные значения э. д. с., так как они в выбранном масштабе представляют величины

$$E_м \sin\alpha = E_м \sin(\omega t + \psi).$$

На графике (рис. 5-9) для момента времени t_1 э. д. с. изображена ординатой $e(t_1)$, равной проекции на ось Y вращаю-

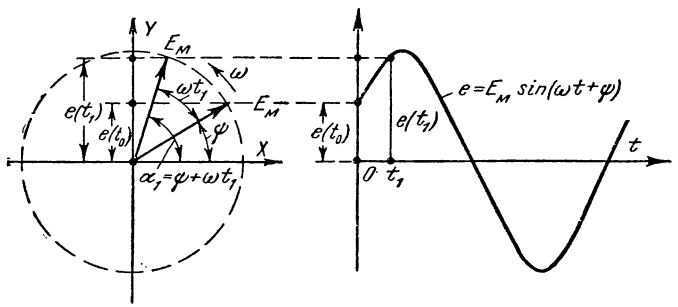


Рис. 5-9. Изображение синусоидальной величины вращающимся вектором.

щегося вектора, расположенного в этот момент под углом $\alpha = (\omega t_1 + \psi)$ к оси абсцисс.

Один или несколько векторов, изображающих синусоидальные величины одной частоты, называются **векторной диаграммой**.

При вращении векторов, образующих векторную диаграмму, взаимное расположение их остается неизменным. Обычно интересным является сдвиг фаз между отдельными величинами. Поэтому при построении векторной диаграммы вектор, который проводится первым, направляют произвольно, а остальные векторы диаграммы располагают по отношению к нему под углами, равными углам сдвига фаз.

Векторные диаграммы широко применяются при рассмотрении явлений в цепях переменного тока.

На рис. 5-10 показаны два вектора э. д. с. $E_{м1}$ и $E_{м2}$ и геометрическая сумма их — вектор суммарной э. д. с. $E_м$ в момент времени $t = 0$. Для любого момента времени

сумма проекций вращающихся векторов $E_{м1}$ и $E_{м2}$ на ось Y равна проекции на ту же ось суммарного вектора $E_м$, т. е. $e = e_1 + e_2$, так как взаимное расположение векторов при их вращении не изменяется.

При сложении двух синусоидальных величин одной частоты получается синусоидальная величина той же частоты, амплитуда которой выражается длиной суммарного вектора, например:

$$\bar{E}_м = \bar{E}_{м1} + \bar{E}_{м2}. \quad (5\text{-}12)$$

Черточки над буквами указывают на то, что величины являются векторами и, следовательно, сложение их производится геометрически по правилу параллелограмма (треугольника).

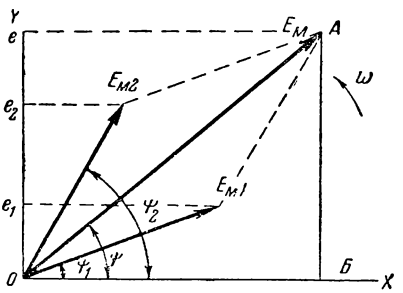


Рис. 5-10. Сложение двух векторов э. д. с.

Начальная фаза суммарной величины (рис. 5-10) определяется по формуле

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{АБ}{ОБ} = \frac{E_{м1}\sin\psi_1 + E_{м2}\sin\psi_2}{E_{м1}\cos\psi_1 + E_{м2}\cos\psi_2}. \quad (5\text{-}13)$$

Вычитание двух синусоидальных величин выполняется как сложение уменьшаемой величины с обратной по знаку вычитаемой величиной, т. е.

$$e_1 - e_2 = e_1 + (-e_2).$$

5-5. ДЕЙСТВУЮЩИЕ ЗНАЧЕНИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Расчет цепей переменного тока упрощается, если пользоваться понятием действующего (эффективного) значения переменного тока.

Действующее значение переменного тока равно значению такого эквивалентного постоянного тока, который, проходя через то же сопротивление, что и переменный ток, выделяет в нем за период переменного тока то же количество тепла.

Согласно ГОСТ действующие значения обозначаются прописными буквами, т. е. ток I, напряжение U.

На шкалах измерительных приборов всегда наносятся действующие значения тока или напряжения.

Если ток изменяется по синусоидальному закону, то действующее значение его составляет 0,707 амплитудного значения тока, т. е.

$$I = \frac{I_м}{\sqrt{2}} = \frac{I_м}{1{,}41} = 0{,}707\, I_м. \qquad (5\text{-}14)$$

То же соотношение имеет место и для синусоидального напряжения, т. е.

$$U = \frac{U_м}{\sqrt{2}} = 0{,}707\, U_м. \qquad (5\text{-}15)$$

Докажем правильность приведенных соотношений. Количество тепла, выделенного постоянным током I в сопротивлении r за период переменного тока T:

$$Q' = 0{,}24\ I^2 r T.$$

Количество тепла, выделенного переменным током в том же сопротивлении за период T, может быть выражено через среднее значение мощности P переменного тока

$$Q'' = 0{,}24 P T.$$

Если $Q' = Q''$, то

$$0{,}24\ I^2 r T = 0{,}24 P T. \qquad (5\text{-}16)$$

В последнем выражении согласно данному выше определению значение эквивалентного постоянного тока I равно действующему значению переменного тока. Таким образом, действующее значение тока

$$I = \sqrt{\frac{P}{r}}. \qquad (5\text{-}17)$$

Мгновенная мощность при синусоидальном токе

$$p = i^2 r = I_м^2 r \sin^2 \omega t,$$

или, приняв во внимание, что $\sin^2 \alpha = 1/2 - \frac{1}{2} \cos 2\alpha$, получим:

$$p = \frac{I_м^2 r}{2} - \frac{I_м^2 r}{2} \cos 2\omega t.$$

Мгновенная мощность при синусоидальном токе может быть представлена суммой двух слагаемых постоянной $1/2\, I_м^2 r$ и переменной, изменяющейся по периодическому синусоидальному закону.

Среднее значение мощности синусоидального тока будет равно постоянной слагаемой

$$P = {}^1/_2 I_м^2 r,$$

так как среднее значение за период синусоидальной слагаемой ${}^1/_2 I_м^2 r \cos 2\omega t$ равно нулю.

Действующее значение переменного синусоидального тока (5-17).

$$I = \sqrt{\frac{P}{r}} = \sqrt{\frac{{}^1/_2 I_м^2 r}{r}} = \frac{I_м}{\sqrt{2}} = 0{,}707\, I_м.$$

Так как действующие значения синусоидальных токов и напряжений в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудных значений, то вектор, выражающий в одном масштабе амплитудное значение, в другом масштабе представляет действующее значение той же величины. В дальнейшем выбор масштабов векторов будет производиться, исходя из действующих значений.

Пример 5-4. Вольтметр, включенный в сеть, показал напряжение 380 *в*.

Определить амплитуду напряжения сети:

$$U_м = \sqrt{2}\, U = 1{,}41 \cdot 380 = 536\ в.$$

5-6. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ О ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Любая электрическая цепь обладает параметрами: сопротивлением r, индуктивностью L и емкостью C.

В цепи постоянного тока при неизменном напряжении будут неизмененными: ток, мощность и запас энергии в электрическом и магнитном полях.

При переменном напряжении на зажимах цепи в ней будет проходить переменный ток, будет изменяться и энергия электрического и магнитного полей.

В технике встречаются цепи, физические явления в которых определяются наличием одного из параметров r, L или C, тогда как другие параметры выявлены слабо и влиянием их можно пренебречь.

Например, лампу накаливания, нагревательный прибор, реостат можно рассматривать как цепь с сопротивлением r, влиянием емкости и индуктивности которой можно пренебречь.

Цепь ненагруженного трансформатора можно рассматривать как индуктивность, пренебрегая влиянием сопротивления и емкости этой цепи.

Наконец, кабель, работающий вхолостую, можно рассматривать как емкость, так как влияние индуктивности и сопротивления этой цепи незначительны.

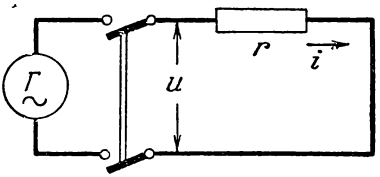


Рис. 5-11. Цепь с сопротивлением.

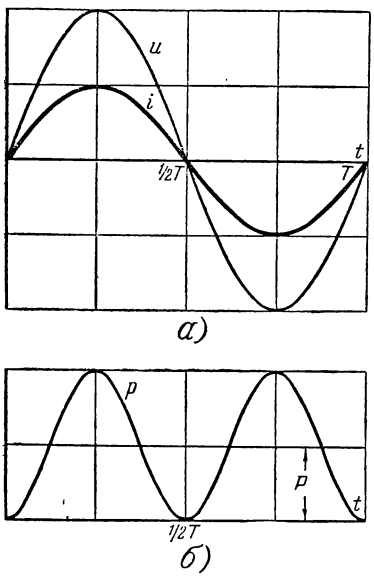


Рис. 5-12. Графики тока, напряжения и мощности цепи с сопротивлением.

5-7. ЦЕПЬ С СОПРОТИВЛЕНИЕМ

а) Напряжение и ток

Цепь, изображенная на рис. 5-11, обладает сопротивлением r.

При синусоидальном напряжении

$$u = U_м \sin \omega t$$

на зажимах цепи ток в ней согласно закону Ома

$$i = \frac{u}{r} = \frac{U_м}{r} \sin \omega t = \\ = I_м \sin \omega t.$$

Ток изменяется синусоидально, совпадая по фазе с напряжением.

На рис. 5-12, *а* показаны изменения напряжения и тока, происходящие в течение одного периода, а на рис. 5-13 — векторная диаграмма цепи с сопротивлением.

Для рассматриваемой цепи закон Ома применим не только для мгновенных и амплитудных значений $i = u/r$ и $I_м = U_м/r$, но и для действующих значений, так как $I_м/\sqrt{2} = I$ и $U_м/\sqrt{2} = U$ и, следовательно,

$$I = \frac{U}{r}. \qquad (5\text{-}18)$$

б) *Мощность*

Произведение мгновенных значений напряжения и тока для одного и того же момента времени представляет собой мгновенное значение мощности

$$p = ui = i^2 r = I_м^2 r \sin^2 \omega t.$$

Мгновенная мощность остается положительной при прямом и обратном направлениях тока (рис. 5-12, *а* и *б*), так как электрическая энергия преобразуется в тепло, независимо от направления тока.

Приняв во внимание, что $\sin^2 \omega t = {}^1/_2 - {}^1/_2 \cos 2\omega t$, можно написать:

$$p = I_м^2 r \sin^2 \omega t = {}^1/_2 I_м^2 r - {}^1/_2 I_м^2 r \cos 2\omega t = I^2 r - I^2 r \cos 2\omega t,$$

так как

$${}^1/_2 I_м^2 = (I_м/\sqrt{2})^2 = I^2.$$

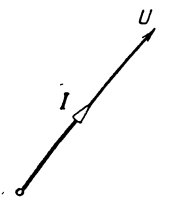


Рис. 5-13. Векторная диаграмма цепи с сопротивлением.

Постоянная величина

$$\boldsymbol{P = I^2 r = UI} \qquad (5\text{-}19)$$

выражает среднюю за период мощность и называется активной мощностью. Сопротивление r, в котором электрическая энергия преобразуется в тепло со средней скоростью P, называется активным сопротивлением.

Активная мощность измеряется в ваттах.

5-8. ЦЕПЬ С ИНДУКТИВНОСТЬЮ

а) Напряжение и ток

Цепь, изображенная на рис. 5-14, обладает индуктивностью и ничтожно малым активным сопротивлением ($r \approx 0$).

При прохождении по цепи тока

$$i = I_м \sin \omega t$$

в ней индуктируется э. д. с. самоиндукции (§ 3-16):

$$e_L = -L \frac{di}{dt}.$$

Для замкнутой цепи согласно второму правилу Кирхгофа $u + e_L = ir = 0$, и, следовательно, напряжение на зажимах индуктивности

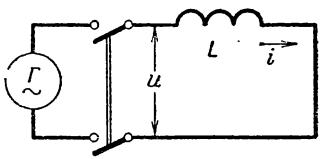


Рис. 5-14. Цепь с индуктивностью.

$$u = -e_L = L\frac{di}{dt}. \quad (5\text{-}20)$$

Написанное уравнение, с одной стороны, показывает, что под действием приложенного напряжения в цепи устанавливается такой ток, который в каждый момент времени индуктирует э. д. с. самоиндукции, равную по величине и противоположную по направлению приложенному напряжению, т. е. э. д. с., уравновешивающую напряжение.

С другой стороны, уравнение (5-20) показывает, что напряжение на индуктивности пропорционально скорости изменения тока по времени.

При синусоидальном токе (рис. 5-15) скорость изменения его

$$\frac{di}{dt} = I_м\frac{d\sin\omega t}{dt} = \omega I_м\cos\omega t,$$

т. е. скорость изменения пропорциональна косинусу. Следовательно, при прохождении тока через максимум скорость его изменения равна нулю, а при прохождении тока через нулевое значение скорость его изменения наибольшая (рис. 5-15).

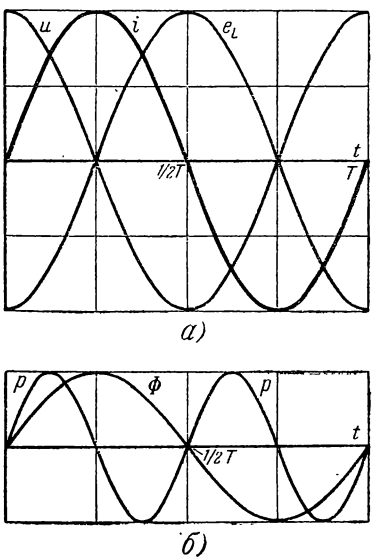


Рис. 5-15. Графики тока, магнитного потока, напряжения и мощности цепи с индуктивностью.

Напряжение на индуктивности

$$u = L\frac{di}{dt} = L\omega I_м\cos\omega t = L\omega I_м\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (5\text{-}21)$$

Таким образом, при синусоидальном токе напряжение на индуктивности также синусоидально, но по фазе опережает ток на угол $\frac{\pi}{2}$ (рис. 5-15).

Индуктированная в цепи э. д. с. самоиндукции

$$e_L = -u = -L\omega I_м \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) =$$

$$= L\omega I_м \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \qquad (5\text{-}22)$$

сдвинута по фазе от напряжения на половину периода.

Векторная диаграмма цепи с индуктивностью дана на рис. 5-16.

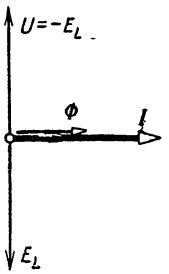


Рис. 5-16. Векторная диаграмма цепи с индуктивностью.

б) Индуктивное сопротивление

Из выражений (5-21) и (5-22) следует, что максимальное значение напряжения и равное ему максимальное значение э. д. с.

$$U_м = E_{Lм} = L\omega I_м. \qquad (5\text{-}23)$$

Разделив написанные выражения на $\sqrt{2}$, получим действующие значения напряжения и э. д. с.

$$U = E_L = L\omega I, \qquad (5\text{-}24)$$

откуда действующее значение тока

$$I = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{x_L}. \qquad (5\text{-}25)$$

Величина, определяемая отношением напряжения к току цепи:

$$\frac{U}{I} = \omega L = 2\pi f L = x_L \qquad (5\text{-}26)$$

называется реактивным сопротивлением индуктивности или просто индуктивным сопротивлением.

Индуктивное сопротивление пропорционально индуктивности и частоте переменного тока. При изменении частоты от $f = 0$ (постоянный ток) до $f = \infty$ оно изменяется от $x_L = 0$ до $x_L = \infty$.

в) Мощность

Мгновенное значение мощности

$$p = ui = U_м \cos \omega t \cdot I_м \sin \omega t.$$

Приняв во внимание, что $\sin \omega t \cos \omega t = \frac{1}{2} \sin 2\omega t$, получим:

$$p = \frac{1}{2} U_м I_м \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t. \qquad (5\text{-}27)$$

На рис. 5-15 показан график мгновенной мощности.

Мгновенная мощность в цепи с индуктивностью изменяется с двойной частотой, достигая то положительного максимума $UI = I^2 \omega L$, то такого же по величине отрицательного максимума.

При нарастании тока, а следовательно, и магнитного потока (первая и третья четверти периода, рис. 5-15), независимо от его направления, происходит накопление энергии магнитного поля от нуля до максимального значения (§ 3-17):

$$W_м = \frac{1}{2} L I_м^2 = L I^2,$$

которая получается от генератора; таким образом, цепь работает в режиме потребителя, что соответствует положительному значению мощности цепи.

При спадании тока, а следовательно, и магнитного потока (вторая и четвертая четверти периода, рис. 5-15) происходит уменьшение энергии магнитного поля от максимального значения до нуля, которая возвращается цепью генератору. Таким образом, в эти части периода цепь работает в режиме генератора, что соответствует отрицательному значению мощности цепи с индуктивностью.

Средняя мощность P в цепи с индуктивностью равна нулю.

Максимальное значение мощности Q в цепи с индуктивностью принято называть реактивной мощностью.

Из (5-27) следует, что

$$Q = \frac{1}{2} U_м I_м = UI = I^2 \omega L = \omega W_м. \qquad (5\text{-}28)$$

Единица измерения реактивной мощности носит название вольт-ампер реактивный (*вар*).

Пример 5-5. Катушка с индуктивностью 0,01 *гн* включена в сеть с напряжением 127 *в* и частотой 50 *гц*.

1. Определить реактивное сопротивление, ток цепи и реактивную мощность:

$$x_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 50 \cdot 0{,}01 = 3{,}14 \text{ ом};$$

$$I = \frac{U}{x_L} = \frac{127}{3{,}14} = 40{,}5 \text{ а};$$

$$Q = UI = 127 \cdot 40{,}5 = 5143{,}5 \text{ вар}.$$

2. Определить реактивное сопротивление и ток при частоте 500 *гц*:

$$x_L = 2\pi fL = 2 \cdot \pi \cdot 500 \cdot 0{,}01 = 31{,}4 \text{ ом};$$

$$I = \frac{U}{x_L} = \frac{127}{31{,}4} = 4{,}05 \text{ а}.$$

г) Зависимость между э. д. с. и магнитным потоком

При расчете цепей переменного тока со сталью часто индуктированную э. д. с. выражают через магнитный поток.

Амплитудное значение потокосцепления самоиндукции

$$\Psi_м = LI_м.$$

Если все витки контура пронизываются одним магнитным потоком, то

$$\Psi_м = w\Phi_м.$$

В этом случае э. д. с. самоиндукции или равное ей напряжение можно выразить:

$$U = E_L = \omega L \frac{I_м}{\sqrt{2}} = 2\pi f \frac{w\Phi_м}{\sqrt{2}} = 4{,}44 f w \Phi_м. \quad (5\text{-}29)$$

5-9. ЦЕПЬ С АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ И ИНДУКТИВНОСТЬЮ

а) Напряжение и ток

Цепь, изображенная на рис. 5-17, обладает активным сопротивлением r и индуктивностью L. Примером такой цепи может служить катушка любого электромагнитного прибора или аппарата.

При прохождении переменного тока i в цепи будет индуктироваться э. д. с. самоиндукции e_L.

Согласно второму правилу Кирхгофа

$$u + e_L = ir,$$

откуда напряжение на зажимах цепи

$$u = ir - e_L = ir + L\frac{di}{dt} = u_a + u_L.$$

Первая слагающая $u_a = ir$ называется активным напряжением, мгновенное значение которого пропорционально току, а вторая $u_L = -e_L = L\frac{di}{dt}$ — реактивным напряжением, мгновенное значение которого пропорционально скорости изменения тока.

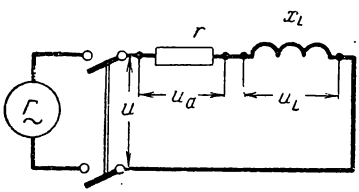


Рис. 5-17. Цепь с активным сопротивлением и индуктивностью.

Если ток изменяется по закону синуса

$$i = I_м \sin \omega t,$$

то активное напряжение

$$u_a = ir = I_м r \sin \omega t = U_{a.м} \sin \omega t.$$

Оно изменяется также синусоидально, совпадая по фазе с током.

Амплитудное значение активного напряжения

$$U_{a.м} = I_м r,$$

а действующее значение

$$U_a = Ir.$$

Реактивное напряжение

$$u_L = L\frac{di}{dt} = \omega L I_м \cos \omega t = U_{Lм} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Оно изменяется синусоидально, опережая по фазе ток на 90°.

Амплитудное значение реактивного напряжения

$$U_{Lм} = \omega L I_м,$$

а действующее значение

$$U_L = \omega L I = x_L I.$$

Напряжение на зажимах цепи

$$u = u_a + u_L =$$

$$= U_{a.м} \sin \omega t + U_{Lм} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_м \sin(\omega t + \varphi). \quad (5\text{-}30)$$

Напряжение на зажимах изменяется синусоидально, опережая ток по фазе на угол φ.

На рис. 5-18 показаны графики: i, u_a, u_L и u, а на рис. 5-19 — векторная диаграмма цепи. На диаграмме векторы напряжений U, U_a и U_L образуют прямоугольный треугольник напряжений, из которого непосредственно следует соотношение, связывающее эти величины:

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}. \quad (5\text{-}31)$$

Аналогичная зависимость имеет место и для амплитудных значений

$$U_м = \sqrt{U_{a.м}^2 + U_{Lм}^2}.$$

Угол сдвига фаз между напряжением на зажимах

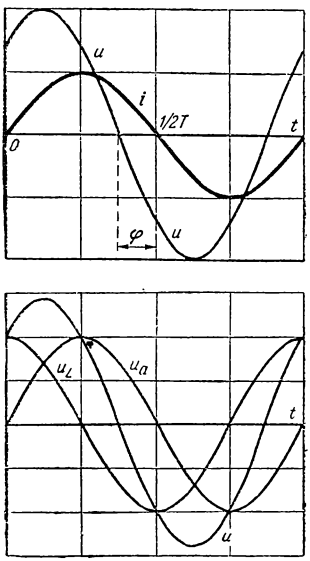


Рис. 5-18. Графики тока и напряжения в цепи с активным сопротивлением и индуктивностью.

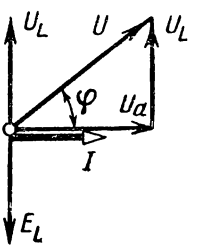


Рис. 5-19. Векторная диаграмма цепи с активным сопротивлением и индуктивностью.

цепи и током в ней находится из треугольника напряжений по одной из формул

$$\cos\varphi = \frac{U_a}{U} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{U_L}{U_a}.$$

Чем больше реактивное напряжение по сравнению с активным, тем на больший угол ток отстает по фазе от напряжения на зажимах цепи.

б) Сопротивления цепи

Уравнение (5-30) можно переписать в следующем виде:

$$U = \sqrt{(Ir)^2 + (Ix_L)^2} = I\sqrt{r^2 + x_L^2} = Iz,$$

откуда ток в цепи

$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_L^2}}. \qquad (5\text{-}32)$$

Величина

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2} \qquad (5\text{-}33)$$

называется полным сопротивлением цепи.

Сопротивления r, x_L и z графически можно изобразить сторонами прямоугольного треугольника — треугольника сопротивлений (рис. 5-20), который можно получить из треугольника напряжений, уменьшив каждую из его сторон в I раз.

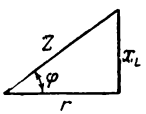


Рис. 5-20. Треугольник сопротивлений цепи с активным сопротивлением и индуктивностью.

Так как треугольники сопротивлений и напряжений подобны, то угол сдвига φ между напряжением и током, равный углу между сторонами треугольника z и r, можно определить через

$$\cos\varphi = \frac{U_a}{U} = \frac{r}{z} \quad \text{или} \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{U_L}{U_a} = \frac{x_L}{r}. \qquad (5\text{-}34)$$

в) Мощности

Мгновенное значение мощности

$$p = ui = U_м \sin(\omega t + \varphi)\, I_м \sin\omega t = U_м I_м \sin(\omega t + \varphi)\sin\omega t.$$

Учитывая, что

$$\sin(\omega t + \varphi)\sin\omega t = \frac{1}{2}\cos\varphi - \frac{1}{2}\cos(2\omega t + \varphi),$$

а также (5-28), можно написать другое выражение мгновенной мощности

$$p = UI\cos\varphi - UI\cos(2\omega t + \varphi). \qquad (5\text{-}35)$$

Написанное выражение состоит из двух членов: постоянного, независимого от времени $UI\cos\varphi$, и переменного си-

нусоидального $UI\cos(2\omega t + \varphi)$. Среднее значение мощности за период, которым обычно пользуются при расчете цепей переменного тока, будет равно постоянному члену $UI\cos\varphi$, так как среднее значение за период синусоидальной функции равно нулю.

Таким образом, среднее значение мощности цепи равно произведению действующих значений напряжения и тока, умноженному на $\cos\varphi$, т. е.

$$P = UI\cos\varphi. \tag{5-36}$$

Так как $U\cos\varphi = U\frac{r}{z} = Ir = U_a$,

то

$$P = U_a I = I^2 r.$$

Следовательно, средняя мощность цепи равна среднему значению мощности в активном сопротивлении. Поэтому среднюю мощность любой цепи называют еще активной мощностью.

Реактивная мощность цепи (5-28):

$$Q = U_L I = I^2 x_L = I^2 z\sin\varphi = UI\sin\varphi, \tag{5-37}$$

т. е. реактивная мощность цепи равна произведению действующих значений напряжения и тока, умноженному на $\sin\varphi$.

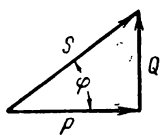


Рис. 5-21. Треугольник мощностей.

Полной мощностью цепи называется произведение действующих значений напряжения и тока, т. е.

$$S = UI. \tag{5-38}$$

Учитывая, что $\sin^2\varphi + \cos^2\varphi = 1$, можно написать:

$$(UI\cos\varphi)^2 + (UI\sin\varphi)^2 = (UI)^2$$

или, что то же,

$$P^2 + Q^2 = S^2,$$

следовательно,

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \tag{5-39}$$

Мощности P, Q и S графически можно изобразить сторонами прямоугольного треугольника — треугольника мощностей (рис. 5-21), который можно получить из треугольника напряжений, умножая на I все его стороны.

Отношение

$$\frac{P}{S} = \cos\varphi, \qquad (5\text{-}40)$$

т. е. отношение активной мощности к полной называется коэффициентом мощности.

Единица полной мощности называется вольт-ампер (*ва*).

Необходимость применения понятия полной мощности обусловлена тем, что конструкция, габариты, вес и стоимость машины или аппарата определяются их номинальной полной мощностью $S_н = U_н I_н$, а полная мощность S при том или ином режиме работы их определяет степень их использования.

Пример 5-6. В сеть с напряжением 250 *в* и частотой 50 *гц* включена катушка с индуктивностью 51 *мгн* и активным сопротивлением 12 *ом*. Определить величины: x_L, z, I, U_a, U_L, $\cos\varphi$ и P:

$$x_L = 2\pi fL = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0{,}051 = 16 \text{ ом};$$

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{12^2 + 16^2} = 200 \text{ ом}; \qquad I = \frac{U}{z} = \frac{250}{20} = 12{,}5 \text{ а};$$

$$U_a = Ir = 12{,}5 \cdot 12 = 150 \text{ в}; \qquad U_L = Ix_L = 12{,}5 \cdot 16 = 200 \text{ в};$$

$$\cos\varphi = \frac{r}{z} = \frac{12}{20} = 0{,}6; \qquad P = UI\cos\varphi = 250 \cdot 12{,}5 \cdot 0{,}6 = 1\,875 \text{ вт}.$$

5-10. НЕРАЗВЕТВЛЕННАЯ ЦЕПЬ С АКТИВНЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ И ИНДУКТИВНОСТЯМИ

Напряжения на активных сопротивлениях двух катушек, соединенных последовательно (рис. 5-22) $U_{a1} = Ir_1$

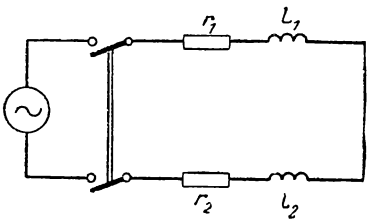


Рис. 5-22. Схема последовательного соединения двух катушек.

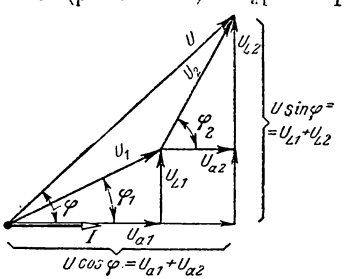


Рис. 5-23. Векторная диаграмма для неразветвленной цепи.

и $U_{a2} = Ir_2$, совпадают по фазе с током I. Напряжения на реактивных сопротивлениях катушек $U_{L1} = Ix_{L1}$ и $U_{L2} = Ix_{L2}$ опережают по фазе ток на 90° (рис. 5-23).

Напряжение на зажимах неразветвленной цепи из двух катушек найдем по правилу треугольника

$$U = \sqrt{(U_{a1} + U_{a2})^2 + (U_{L1} + U_{L2})^2} = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}.$$

Выражая слагающие напряжений через ток и сопротивления, получим:

$$U = I\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_{L1} + x_{L2})^2} = I\sqrt{r^2 + x^2} = Iz,$$

где $r = r_1 + r_2$ — активное сопротивление цепи;

$x = x_{L1} + x_{L2}$ — реактивное сопротивление цепи.

Полное сопротивление цепи

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2}.$$

На рис. 5-24 оно изображено гипотенузой прямоугольного треугольника сопротивлений, который можно получить из векторной диаграммы, уменьшая каждую из сторон треугольника напряжений в I раз.

Ток цепи

$$I = \frac{U}{z}$$

отстает по фазе от напряжения цепи на угол φ, который можно определить через его косинус

$$\cos\varphi = \frac{r}{z},$$

или через его тангенс

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{x_L}{r}.$$

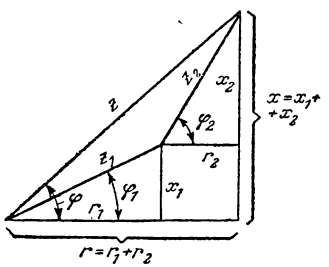


Рис. 5-24. Треугольник сопротивлений для неразветвленной цепи.

Средняя или активная мощность цепи двух катушек

$$P = P_1 + P_2 = UI\cos\varphi.$$

Реактивная мощность этой цепи

$$Q = UI\sin\varphi.$$

Полная мощность цепи

$$S = UI.$$

5-11. РАЗВЕТВЛЕННАЯ ЦЕПЬ С АКТИВНЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ И ИНДУКТИВНОСТЯМИ

Ток в первой параллельной ветви (рис. 5-25):

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{U}{\sqrt{r_1^2 + x_{L1}^2}}$$

отстает по фазе от напряжения на угол, который можно определить через его $\operatorname{tg}\varphi_1 = x_{L_1}/r_1$.

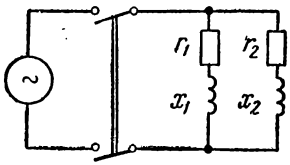


Рис. 5-25. Схема параллельного соединения двух катушек.

Ток во второй параллельной ветви (рис. 5-25):

$$I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{U}{\sqrt{r_2^2 + x_{L2}^2}}$$

отстает по фазе от напряжения на угол, тангенс которого $\operatorname{tg}\varphi_2 = x_{L_2}/r_2$.

Для упрощения расчетов разветвленных цепей ток каждой ветви раскладывают на слагающие. Одна слагающая — активная (I_a) совпадает по фазе с напряжением. Другая слагающая — реактивная (I_p) сдвинута по фазе от напряжения на 90°.

Слагающие тока первой параллельной ветви (рис. 5-26):

$$I_{a1} = I_1 \cos\varphi_1 \quad \text{и}$$
$$I_{p1} = I_1 \sin\varphi_1. \quad (5\text{-}41)$$

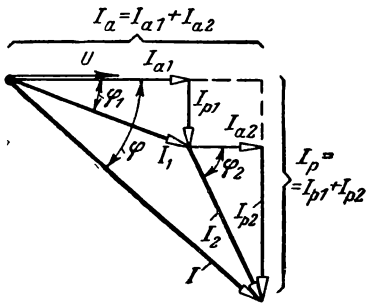


Рис. 5-26. Векторная диаграмма разветвленной цепи переменного тока.

При построении векторной диаграммы вектор активной слагающей тока, откладывается по направлению вектора напряжения. Вектор реактивной индуктивной слагающей откладывается под углом 90° в направлении вращения часовой стрелки. Замыкающий вектор треугольника токов представляет собой вектор тока первой ветви

$$I_1 = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{p1}^2}. \quad (5\text{-}42)$$

Для второй параллельной ветви

$$I_{a2} = I_2 \cos\varphi_2; \qquad I_{p2} = I_2 \sin\varphi_2; \qquad I = \sqrt{I_{a2}^2 + I_{p2}^2}.$$

Алгебраическая сумма активных слагающих токов ветвей, совпадающих по фазе, равна активной слагающей общего тока

$$I_a = I_{a1} + I_{a2}.$$

Алгебраическая сумма реактивных слагающих токов ветвей, имеющих одну и ту же фазу, равна реактивной слагающей общего тока

$$I_p = I_{p1} + I_{p2}.$$

Общий ток, проходящий в неразветвленной части цепи,

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}.$$

Этот ток сдвинут по фазе от напряжения на угол φ, который можно определить через

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{I_p}{I_a}.$$

Активная мощность цепи, равная сумме активных мощностей отдельных ветвей:

$$P = P_1 + P_2 = UI_1 \cos\varphi_1 + UI_2 \cos\varphi_2 = UI\cos\varphi.$$

Аналогично реактивная мощность цепи

$$Q = Q_1 + Q_2 = UI_1 \sin\varphi + UI_2 \sin\varphi = UI\sin\varphi.$$

Полная мощность цепи

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Пример 5-7. Цепь с двумя параллельными ветвями (рис. 5-25), в одной из которых включена катушка с активным сопротивлением $r_1 = 1$ *ом* и реактивным сопротивлением $x_{L_1} = 3$ *ом*, а в другой катушка с сопротивлениями $r_2 = 3$ *ом* и $x_{L_2} = 2$ *ом*, присоединена к сети с напряжением 230 *в*. Определить токи в ветвях и общий ток цепи:

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{230}{\sqrt{1^2 + 3^2}} = 72{,}8\ a; \qquad I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{230}{\sqrt{3^2 + 2^2}} = 64\ a;$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{r_1}{z_1} = \frac{1}{3{,}16} = 0{,}317; \qquad \sin\varphi_1 = \frac{x_{L1}}{z_1} = \frac{3}{3{,}16} = 0{,}95;$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{r_2}{z_2} = \frac{3}{3{,}6} = 0{,}833; \qquad \sin\varphi_2 = \frac{x_{L2}}{z_2} = \frac{2}{3{,}6} = 0{,}556.$$

Слагающие тока первой параллельной ветви

$$I_{a1} = I_1 \cos\varphi_1 = 72{,}8 \cdot 0{,}317 = 23\ a;$$
$$I_{p1} = I_1 \sin\varphi_1 = 72{,}8 \cdot 0{,}95 = 69\ a.$$

Слагающие тока второй параллельной ветви

$$I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2 = 64 \cdot 0{,}833 = 53{,}2 \ a;$$
$$I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2 = 64 \cdot 0{,}556 = 35{,}4 \ a.$$

Слагающие общего тока

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = 23 + 53{,}2 = 76{,}2 \ a;$$
$$I_p = I_{p1} + I_{p2} = 69 + 35{,}4 = 104{,}4 \ a.$$

Общий ток цепи

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{76{,}2^2 + 104{,}4^2} = 129{,}4 \ a.$$

5-12. ЦЕПЬ С ЕМКОСТЬЮ

а) Напряжение и ток

Приложив к зажимам конденсатора (рис. 5-27) напряжение

$$u = U_м \sin \omega t,$$

на обкладках его получим заряд

$$q = Cu = CU_м \sin \omega t,$$

изменяющийся пропорционально напряжению (рис. 5-28).

Ток в цепи конденсатора

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}$$

пропорционален скорости изменения заряда конденсатора или скорости изменения напряжения на его зажимах.

Синусоидальное напряжение в моменты прохождения

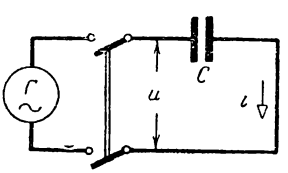
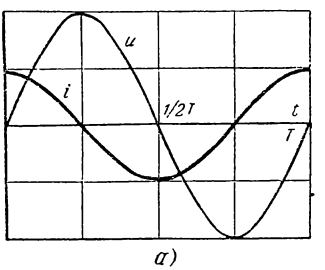
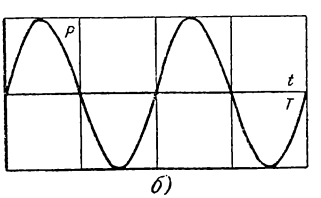


Рис. 5-27. Цепь с емкостью.



а)



б)

Рис. 5-28. Графики тока, напряжения и мощности цепи с емкостью.

через нулевые значения (рис. 5-28) имеет наибольшую скорость изменения, следовательно, в эти моменты времени сила тока в цепи конденсатора будет иметь наибольшее значение. В моменты прохождения напряжения через амплитудные значения скорость изменения его, а следовательно, и сила тока в цепи будут равны нулю.

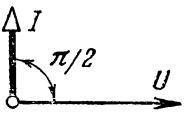


Рис. 5-29. Векторная диаграмма цепи с емкостью.

Таким образом, ток в цепи конденсатора

$$i = C\frac{du}{dt} = CU_м\frac{d\sin\omega t}{dt} = C\omega U_м\cos\omega t = \\ = I_м\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \qquad (5\text{-}43)$$

изменяется синусоидально, опережая по фазе напряжение на угол 90°.

Векторная диаграмма цепи с емкостью дана на рис. 5-29.

б) Емкостное сопротивление

Из выражения (5-43) следует, что амплитуда тока

$$I_м = C\omega U_м.$$

Разделив написанное выражение на $\sqrt{2}$, получим:

$$I = C\omega U = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{U}{x_C}. \qquad (5\text{-}44)$$

Величина

$$x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} \qquad (5\text{-}45)$$

называется реактивным сопротивлением емкости или емкостным сопротивлением.

Емкостное сопротивление обратно пропорционально емкости и частоте переменного тока. При изменении частоты от $f = 0$ (постоянный ток) до $f = \infty$ оно изменяется от $x_C = \infty$ до $x_C = 0$.

в) Мощность

Мгновенное значение мощности

$$p = ui = U_м\sin\omega t I_м\cos\omega t = UI\sin 2\omega t.$$

На рис. 5-28, *б* показан график мгновенной мощности.

Мгновенная мощность в цепи с емкостью изменяется с двойной частотой, достигая то положительного максимума $UI = I^2 \frac{1}{\omega C}$, то такого же по величине отрицательного максимума. При нарастании напряжения (первая и третья четверти периода, рис. 5-28) происходит накопление энергии электрического поля от нуля до максимального значения

$$W_м = \frac{CU_м^2}{2} = CU^2, \qquad (5\text{-}46)$$

которая получается от генератора, таким образом, цепь работает в режиме потребителя, что соответствует положительному значению мощности.

При уменьшении напряжения (вторая и четвертая четверти периода, рис. 5-28) происходит уменьшение энергии электрического поля от максимального значения до нуля, которая возвращается цепью генератору. Таким образом, в эти части периода цепь работает в режиме генератора, что соответствует отрицательному значению мощности цепи с емкостью. Энергия, получаемая цепью за полупериод, равна нулю, следовательно, равна нулю и средняя мощность цепи.

Максимальное значение мощности в цепи с емкостью называется реактивной мощностью

$$Q = UI = U^2\omega C = W_м\omega.$$

Она характеризует скорость обмена энергией между генератором и цепью с емкостью.

Пример 5-8. Конденсатор емкостью 80 *мкф* включен в сеть с напряжением 380 *в* и частотой 50 *гц*.

Определить: x_C, I и $W_м$;

$$x_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 80 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{25\,000} = 40 \text{ ом};$$

$$I = \frac{U}{x_C} = \frac{380}{40} = 9{,}5 \text{ а};$$

$$W_м = CU^2 = 80 \cdot 10^{-6} \cdot 380^2 = 11{,}5 \text{ дж}.$$

5-13. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

Если по неразветвленной цепи (рис. 5-30), состоящей из активного сопротивления r, индуктивности L и емкости C, проходит ток

$$i = I_м \sin \omega t,$$

то напряжение на зажимах цепи состоит из трех слагающих (рис. 5-31): активного напряжения $U_a = Ir$, совпадающего по фазе с током, индуктивного напряжения $U_L = Ix_L$, опережающего ток на 90°, и емкостного напряжения

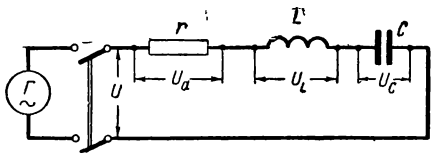


Рис. 5-30. Цепь с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью.

$U_C = Ix_C$, отстающего по фазе от тока на 90°. Из векторной диаграммы (рис. 5-31) следует, что напряжение на зажимах цепи может быть найдено из прямоугольного треугольника, одним катетом которого является вектор активного напряжения, а другим — разность векторов напряжения на индуктивности и емкости. Таким образом, напряжение цепи

$$U = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2}. \quad (5\text{-}47)$$

Выражая напряжения на отдельных участках цепи через произведения тока и соответствующие сопротивления, получим:

$$U = \sqrt{(Ir)^2 + (Ix_L - Ix_C)^2} =$$

$$= I\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = Iz, \quad (5\text{-}48)$$

а ток цепи

$$I = \frac{U}{z}.$$

Полное сопротивление цепи

$$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}. \quad (5\text{-}49)$$

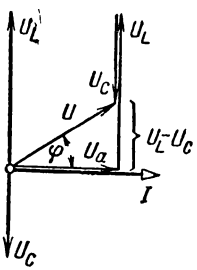


Рис. 5-31. Векторная диаграмма цепи с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью при $x_L > x_C$.

Это сопротивление графически может быть представлено гипотенузой прямоугольного треугольника сопротивлений, который можно получить из треугольника напряжений, если стороны последнего уменьшить в I раз.

Ток сдвинут по фазе от напряжения цепи на угол φ, который можно определить через его тангенс:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{U_L - U_C}{U} = \frac{x_L - x_C}{r}.$$

Ток отстает по фазе от напряжения на угол φ при $x_L > x_C$, а следовательно, и при $U_L > U_C$ (рис. 5-31); наоборот, при $x_L < x_C$ и $U_L < U_C$ ток опережает напряжение.

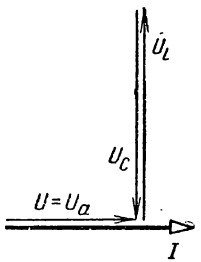


Рис. 5-32. Векторная диаграмма при резонансе напряжений.

При $x_L = x_C$ наступает р е з о н а н с н а п р я ж е н и й, при котором полное сопротивление цепи равно активному сопротивлению

$$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = r.$$

Следовательно, полное сопротивление цепи будет наименьшим, а действующее значение тока при заданном напряжении достигает наибольшего значения, совпадая по фазе с напряжением цепи.

Так как индуктивное напряжение U_L и емкостное U_C равны и изменяются в противофазе (рис. 5-32), то напряжение цепи равно активному напряжению $U = U_a$.

Отношение напряжения на одном из реактивных участков, например U_L, к напряжению цепи U:

$$\frac{U_L}{U} = \frac{Ix_L}{Iz} = \frac{x_L}{z} = \frac{x_L}{r},$$

откуда

$$U_L = U\frac{x_L}{r}. \qquad (5\text{-}50)$$

Таким образом, напряжение на индуктивности U_L и равное ему напряжение на емкости U_C при $x_L = x_C > r$ больше напряжения на зажимах цепи U во столько раз, во сколько x_L больше r. Следовательно, при резонансе напряжений на отдельных участках цепи могут возникнуть напряжения, значительно превышающие напряжение сети.

Из сказанного выше следует, что мгновенные значения напряжений на индуктивности и емкости равны по величине

и противоположны по знаку $u_L = -u_C$ (рис. 5-33) и, следовательно, в любой момент времени равны по величине и противоположны по знаку мгновенные мощности реактивных участков цепи, так как

$$p_L = iu_L = -p_C = -iu_C.$$

Нетрудно придти к выводу, что увеличение энергии магнитного поля происходит за счет уменьшения энергии электрического поля и наоборот, а от генератора энергия поступает только в активное сопротивление, где и происходит необратимый процесс преобразования ее в тепло.

При резонансе напряжений в цепи происходит периодический обмен энергией между магнитным полем и электрическим полем.

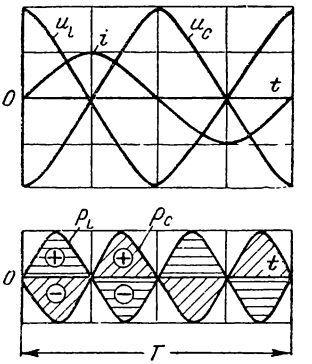


Рис. 5-33. Графики тока, напряжений и мощности при резонансе напряжений.

На рис. 5-33 даны графики тока i напряжений u_L и u_C и мощностей p_L и p_C. Горизонтально заштрихованные площадки изображают энергию, затраченную на образование магнитного поля «+» и выделенную при его исчезновении. Наклонно заштрихованные площадки изображают энергию, затраченную на образование электрического поля «+» и выделенную при его исчезновении «—».

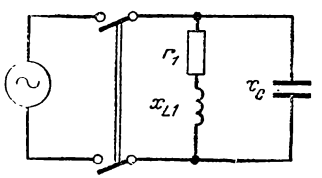


Рис. 5-34. Схема разветвленной цепи.

5-14. РЕЗОНАНС ТОКОВ

При синусоидальном напряжении на зажимах разветвленной цепи (рис. 5-34) ток в первой параллельной ветви — в катушке

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{U}{\sqrt{r_1^2 + x_{L1}^2}}.$$

Этот ток отстает по фазе от напряжения на угол φ_1, тангенс которого

$$\operatorname{tg}\varphi_1 = \frac{x_{L1}}{r_1}.$$

Активная слагающая тока катушки $I_{a1} = I_1 \cos\varphi_1$, а реактивная слагающая его $I_{p1} = I_1 \sin\varphi_1$.

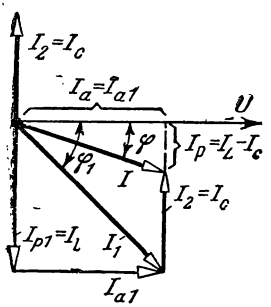


Рис. 5-35. Векторная диаграмма для разветвленной цепи.

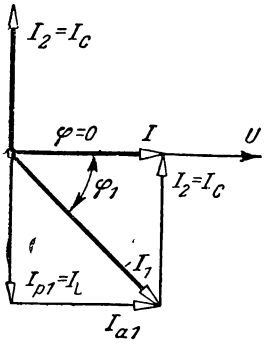


Рис. 5-36. Векторная диаграмма при резонансе токов.

Ток во второй параллельной ветви — в конденсаторе

$$I_2 = \frac{U}{x_2} = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = U\omega C = I_C.$$

Он опережает по фазе напряжение на 90°.

Общий ток найдем как геометрическую сумму токов ветвей (рис. 5-35):

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2},$$

где $I_a = I_{a1}$, а $I_p = I_L - I_C = I_{p1} - I_{p2}$.

Угол сдвига общего тока от напряжения можно определить через его

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{I_p}{I_a} = \frac{I_L - I_C}{I_{a1}}.$$

Общий ток может отставать на угол φ от напряжения при $I_L > I_C$ или опережать его при $I_L < I_C$ или, наконец, совпадать по фазе с напряжением (рис. 5-36) при $I_L = I_C$.

В последнем случае в цепи имеет место **резонанс токов**.

При резонансе общий ток

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = I_a,$$

т. е. он равен активной составляющей тока в катушке, который всегда меньше всего тока катушки I_1. Следовательно, включив параллельно катушке конденсатор определенной емкости, ток которого равен реактивной составляющей тока катушки, получим $\varphi = 0$ и $\cos \varphi = 1$.

Таким образом, при неизменной мощности $P = UI \cos \varphi = UI$ потребителя, в нашем случае — катушки, получим уменьшение тока с I_1 до I (рис. 5-36) в подводящих проводах и в генераторе, питающем установку.

При синусоидальном токе в течение одной четверти периода, ток в катушке увеличивается и в магнитном поле ее запасается энергия. В течение следующей четверти периода при уменьшении тока и исчезновении магнитного поля энергия возвращается обратно. В конденсаторе энергия запасается в течение той четверти периода, когда напряжение нарастает, и возвращается им, когда напряжение спадает. Нетрудно понять, что в то время, когда энергия расходуется на создание магнитного поля, она в равном количестве освобождается при разрядке конденсатора и наоборот. Следовательно, при резонансе токов энергия, запасаемая в магнитном поле, идет из одной параллельной ветви в другую. Этим и объясняется уменьшение тока в подводящих проводах.

5-15. КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ

Полное использование мощности генератора происходит при его работе с номинальным напряжением, номинальным током и $\cos \varphi = 1$, так как в этом случае он развивает наибольшую активную мощность, равную его полной номинальной мощности:

$$P = U_н I_н \cos \varphi = U_н I_н = S_н. \qquad (5\text{-}51)$$

Так как активная мощность пропорциональна $\cos \varphi$, то уменьшение его влечет за собой неполное использование мощности генератора.

С другой стороны ток приемника энергии при постоянном действующем значении напряжения, работающего с по-

стоянной активной мощностью, изменяется обратно пропорционально cos φ:

$$I = \frac{P}{U}\frac{1}{\cos\varphi} = \text{const}\frac{1}{\cos\varphi}.$$

Таким образом, уменьшение cos φ, зависящего от приемника энергии, повлечет за собой увеличение тока, следовательно, и увеличение мощности потерь на нагревание в проводах и источнике питания.

Неполное использование установленной мощности генераторов станции и увеличение потерь электроэнергии при уменьшении cos φ делают необходимым повышение cos φ каждой установки до значений, близких к единице.

У большинства двигателей cos φ зависит от нагрузки, изменяясь от 0,1—0,3 при холостом ходе и повышаясь до 0,8—0,9 при номинальной нагрузке.

Следовательно, повышение cos φ требует повышения загрузки установленных двигателей. Кроме того, для повышения cos φ параллельно двигателям присоединяют конденсаторы.

Повышение cos φ электрических установок является весьма важной народнохозяйственной задачей, так как это повышение обозначает экономию огромного количества электроэнергии, теряемой в сетях и генераторах при низком cos φ, и улучшение использования огромных мощностей генераторов электростанций.

Пример 5-9. К сети с напряжением 380 *в* и частотой 50 *гц* присоединен электродвигатель мощностью 14 *квт*, cos φ = 0,6.

Для повышения cos φ установки до значения 0,9 необходимо подключить конденсатор. Определить емкость конденсатора.

Ток электродвигателя

$$I_1 = \frac{P}{U\cos\varphi_1} = \frac{14\,000}{380 \cdot 0{,}6} = 61{,}4 \ a.$$

По тригонометрическим таблицам находим:

$$\varphi_1 = 53°10' \text{ и } \sin\varphi_1 = 0{,}8.$$

Реактивная слагающая тока электродвигателя

$$I_{p1} = I_1 \sin\varphi_1 = 61{,}4 \cdot 0{,}8 = 49{,}1a.$$

При cos φ = 0,9 установка, состоящая из двигателя и конденсатора, потребляет ток

$$I_2 = \frac{P}{U\cos\varphi} = \frac{14\,000}{380 \cdot 0{,}9} = 41 \ a.$$

По тригонометрическим таблицам находим: $\cos\varphi = 0{,}9$ соответствует угол $\varphi = 25°50'$, $\sin\varphi = 0{,}436$.

Реактивная слагающая тока установки

$$I_{p2} = I_2 \sin\varphi = 41 \cdot 0{,}436 = 17{,}9 \ a.$$

Уменьшение реактивной слагающей тока, вызванное включением конденсатора, равное току конденсатора:

$$I_C = I_{p1} - I_{p2} = 49{,}1 - 17{,}9 = 31{,}2 \ a.$$

Реактивное сопротивление конденсатора

$$x_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot fC} = \frac{U}{I_C} = \frac{380}{31{,}2} = 12{,}2 \ ом,$$

откуда искомая емкость

$$C = \frac{1}{x_C \cdot 2\pi f} = \frac{1}{12{,}2 \cdot 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50} = 0{,}00026 \ ф = 260 \ мкф.$$

5-16. АКТИВНАЯ И РЕАКТИВНАЯ ЭНЕРГИЯ

Величина, определяемая произведением активной мощности P и времени t, в течение которого она остается неизменной, называется активной энергией

$$W_a = Pt = UI \cos\varphi \cdot t. \qquad (5\text{-}52)$$

Она характеризует электрическую энергию, израсходованную в цепи переменного тока.

Если в течение времени t мощность изменяется, то время t делят на промежутки t_1, t_2, t_3 и т. д., в течение каждого из которых мощность остается неизменной и энергию определяют как сумму энергий

$$W_a = P_1 t_1 + P_2 t_2 + \ldots = W_{a1} + W_{a2} + \ldots$$

Активная энергия измеряется счетчиками активной энергии.

Величина, определяемая произведением реактивной мощности Q и времени t, называется реактивной энергией

$$W_p = Qt = UI \sin\varphi \cdot t. \qquad (5\text{-}53)$$

Она является расчетной величиной.

При изменяющейся реактивной мощности реактивная энергия определяется по формуле

$$W_p = Q_1 t_1 + Q_2 t_2 + \ldots = W_{p1} + W_{p2} + \ldots$$

Реактивная энергия измеряется счетчиками реактивной энергии.

Измерив за один и тот же промежуток времени активную и реактивную энергию, можно определить коэффициент мощности цепи

$$\frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_p^2}} = \frac{UI\cos\varphi \cdot t}{\sqrt{(UI\cos\varphi \cdot t)^2 + (UI\sin\varphi \cdot t)^2}} =$$

$$= \frac{\cos\varphi}{\sqrt{\cos^2\varphi + \sin^2\varphi}} = \cos\varphi. \qquad (5\text{-}54)$$

При изменяющихся мощностях по показанию счетчиков по приведенной формуле определяется среднее значение коэффициента мощности.

Пример 5-10. В начале месяца счетчик активной энергии показал 1 762 *квт · ч*, а счетчик реактивной энергии 736 *квар · ч*. В конце месяца первый показал 1 922 *квт · ч*, а второй 846 *квар · ч*.

Определить среднее за месяц значение коэффициента мощности установки.

Израсходованная за месяц активная энергия

$$W_a = 1\,922 - 1\,762 = 160 \text{ квт} \cdot \text{ч};$$

израсходованная за то же время реактивная энергия:

$$W_p = 846 - 736 = 110 \text{ квар} \cdot \text{ч};$$

$$\cos\varphi_{ср} = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_p^2}} = \frac{160}{\sqrt{160^2 + 110^2}} = 0{,}82.$$

5-17. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ, ИНДУКТИВНОСТЬЮ И ЕМКОСТЬЮ

Перед выполнением работы ознакомиться с содержанием § 5-13.

План работы

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием, необходимыми для выполнения работы; записать их основные технические данные.
2. Собрать схему (рис. 5-37) и показать ее руководителю.
3. Установить $x_L > x_C$, измерить напряжение и активную мощность в каждом участке цепи (между точками *АБ*, *ББ* и *ВГ*) и во всей цепи (между точками *АГ*).
4. По полученным данным вычислить для каждого участка и всей цепи

$$r = \frac{P}{I^2}; \qquad z = \frac{U}{I};$$

$$x = \sqrt{z^2 - r^2}; \qquad U_a = Ir; \qquad U_p = Ix; \qquad \operatorname{tg}\varphi = \frac{x}{r}.$$

5. Результаты измерений и расчетов записать в табл. 5-1.
6. По полученным данным построить в масштабе векторную диаграмму напряжений и диаграмму сопротивлений.

7. Установить $x_L = x_C$ (по наибольшему току в цепи) и для этого случая (резонанс напряжений) повторить все указанные выше измерения и вычисления. Результаты измерений и расчетов записать в табл. 5-1.

8. По полученным данным построить в масштабе векторную диаграмму напряжений и диаграмму сопротивлений.

9. Повторить все измерения и вычисления при $x_L < x_C$. Результаты записать в табл. 5-1. Построить в масштабе векторную диаграмму напряжений и диаграмму сопротивлений.

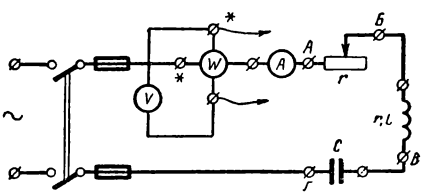


Рис. 5-37. Схема для выполнения лабораторной работы.

Таблица 5-1

№ п/п.	При соотношении	Участок цепи	U	I	P	r	z	x	U_a	U_p	$\operatorname{tg}\varphi$	$\angle\varphi$
			в	*а*	*вт*	*ом*	*ом*	*ом*	*в*	*в*	—	—
1	$x_L > x_C$	Реостат Катушка Конденсатор Вся цепь										
2	$x_L = x_C$	Реостат Катушка Конденсатор Вся цепь										
3	$x_L < x_C$	Реостат Катушка Конденсатор Вся цепь										

5-18. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ КАТУШКИ И КОНДЕНСАТОРА

Перед выполнением работ ознакомиться с содержанием § 5-14 и § 5-15.

План работы

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для проведения работы. Записать основные технические характеристики измерительных приборов и оборудования.

2. Собрать схему (рис. 5-38) и показать ее руководителю.

3. Увеличивая емкость конденсатора (при неизменных r и L катушки), записать показания измерительных приборов. По полученным данным определить: r_1; x_C; I_{a1}; I_{p1}; $\cos\varphi_1$; $\cos\varphi$; $\angle\varphi$.

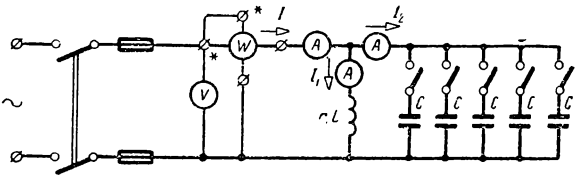


Рис. 5-38. Схема для выполнения лабораторной работы.

Показания приборов и результаты расчета записать в табл. 5-2.

4. Пользуясь полученными данными построить графики:

$$I_1 = f(x_C); \quad I_2 = f(x_C); \quad I = f(x_C) \text{ и } \cos\varphi = f(x_C).$$

5. Для трех случаев, когда $I_{p1} > I_2$; $I_{p1} = I_2$; $I_{p1} < I_2$, построить в масштабе векторную диаграмму.

Таблица 5-2

U	I	I_1	I_2	P	z_1	x_C	I_{a_1}	I_{p_1}	$\cos\varphi_1$	$\sin\varphi_1$	$\cos\varphi$	$\angle\varphi$
в	*а*	*а*	*а*	*вт*	*ом*	*ом*	*а*	*а*	—	—	—	—

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ТРЕХФАЗНЫЙ ТОК

6-1. ПОЛУЧЕНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Система трехфазного тока получила повсеместное применение, как обеспечивающая наиболее выгодную передачу энергии и позволяющая применять простые и надежные в работе трехфазные электродвигатели, генераторы и трансформаторы.

Основоположником трехфазного тока М. О. Доливо-Добровольским создан трехфазный генератор, трехфазный

электродвигатель, трехфазный трансформатор и выполнена первая в мире передача энергии трехфазного тока.

М. О. Доливо-Добровольский (1862—1919).

Трехфазной системой называется совокупность трех электрических цепей, э. д. с. которых имеют одинаковую частоту и сдвинуты по фазе одна от другой на $^1/_3$ периода. При равенстве амплитуд э. д. с. трехфазная система называется симметричной.

Простейший генератор трехфазного тока (рис. 6-1) отличается от однофазного, рассмотренного в § 5-2, тем, что на якорь наложены три обмотки — катушки, сдвинутые друг относительно друга по окружности цилиндра на углы 120°. Обмотки генератора называются фазами.

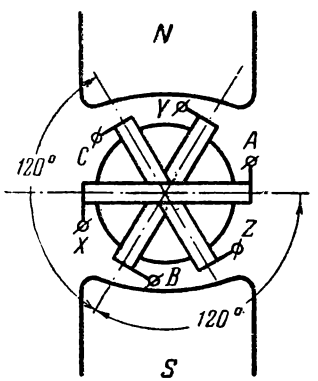


Рис. 6-1. Простейший генератор трехфазного тока.

При вращении якоря с неизменной скоростью в обмотках наводятся э. д. с. одной частоты и с одинаковыми амплитудами. За один оборот якоря э. д. с. каждой из обмоток пройдет полный цикл изменений, что соответствует периоду T э. д. с. Вследствие сдвига обмоток в пространстве на углы 120° э. д. с., наведенные в них, сдвинуты по фазе друг относительно друга на $^1/_3$ периода или на угол $^2/_3\pi$.

Если начало отсчета времени совпадает с началом периода э. д. с. первой фазы e_A, то ее можно выразить уравнением

$$e_A = E_м \sin \omega t. \qquad (6\text{-}1)$$

Электродвижущая сила второй фазы генератора e_B, отстающая от э. д. с. e_A на $^1/_3$ периода, запишется:

$$e_B = E_м \sin(\omega t - {}^2/_3\pi). \qquad (6\text{-}2)$$

Электродвижущая сила третьей фазы генератора e_C, отстающая от э. д. с. e_B на $^1/_3$ периода или опережающая на $^1/_3$ периода э. д. с. первой фазы e_A, выразится уравнением

$$e_C = E_м \sin(\omega t - {}^4/_3\pi) = E_м \sin(\omega t + {}^2/_3\pi). \qquad (6\text{-}3)$$

Графики этих э. д. с. показаны на рис. 6-2, а векторная диаграмма — на рис. 6-3.

Направления э. д. с. в обмотках генератора от концов фаз (зажимы X, Y, Z) к началам их (зажимы A, B, C) примем за положительные.

Каждая обмотка трехфазного генератора может замыкаться на свою внешнюю цепь. В этом случае получится несвязанная трехфазная шестипроводная система. На практике обычно обмотки трехфазного генератора соединяются звездой или треугольником. В этом случае вместо шести проводов применяют три или четыре провода, что экономичней.

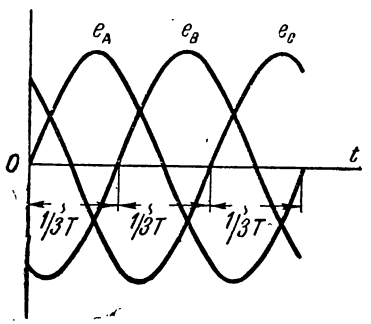


Рис. 6-2. График симметричных э. д. с. трехфазной системы.

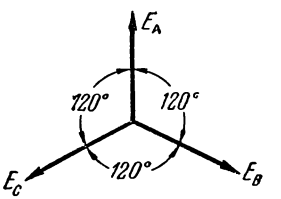


Рис. 6-3. Векторная диаграмма симметричных э. д. с.

6-2. СОЕДИНЕНИЕ ОБМОТОК ГЕНЕРАТОРА ЗВЕЗДОЙ

При соединении звездой к началам обмоток генератора A, B, C присоединяются линейные провода. Концы обмоток X, Y, Z соединяются в узел, называемый нейтралью генератора, или нулевой точкой. К этой точке присоединяется нейтральный провод (рис. 6-4).

Напряжение между началом и концом фазы называется ф а з н ы м напряжением и обозначается U_A, U_B или U_C, а в общем виде $U_ф$. Фазное напряжение будет и между каждым из линейных проводов и нейтральным проводом.

Если пренебречь падениями напряжения в обмотках генератора, то фазные напряжения будут равны фазным э. д. с.

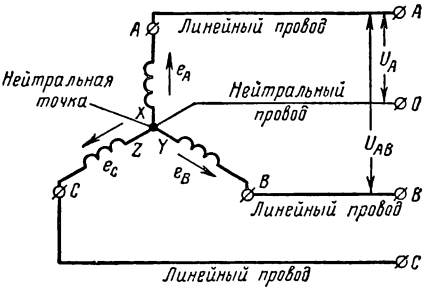


Рис. 6-4. Схема соединения обмоток генератора звездой.

Напряжения между началами обмоток (или между проводами, присоединенными к ним) называются л и н е й н ы м и напряжениями и обозначаются U_{AB}, U_{BC} или U_{CA}, а в общем виде $U_л$.

Конец первой фазы X соединен не с началом второй фазы, а с концом ее Y, вследствие чего мгновенное значение линейного напряжения между проводами A и B равно не сумме, а разности соответствующих напряжений

$$u_{AB} = u_A - u_B.$$

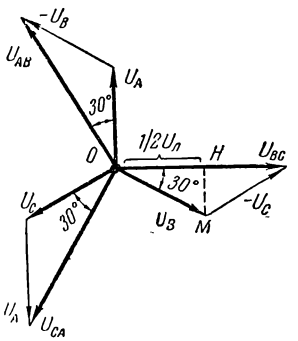


Рис. 6-5. Векторная диаграмма напряжений трехфазной цепи.

Аналогично мгновенные значения других линейных напряжений

$$u_{BC} = u_B - u_C \quad \text{и} \quad u_{CA} = u_C - u_A.$$

Фазные и линейные напряжения изменяются синусоидально, поэтому соотношение между действующими значениями этих величин можно определить из векторной диаграммы (рис. 6-5).

Векторы фазных напряжений U_A, U_B и U_C повернуты друг относительно друга на 120°. Для нахождения вектора линейного напряжения U_{AB} к вектору фазного напряжения U_A прибавляют повернутый на 180° вектор напряжения U_B. Аналогично вектор линейного напряжения U_{BC} находят как разность векторов напряжений

U_B и U_C и вектор напряжения U_{CA} как разность векторов U_C и U_A.

Восстановив перпендикуляр из середины вектора линейного напряжения, например U_{BC}, получим прямоугольный треугольник OHM (рис. 6-5), из которого следует, что

$$\frac{1}{2} U_л = U_ф \cos 30^\circ = U_ф \frac{\sqrt{3}}{2}$$

или

$$U_л = \sqrt{3} U_ф. \qquad (6\text{-}4)$$

Таким образом, при соединении звездой при симметричной системе фазных напряжений действующее значение линейного напряжения в $\sqrt{3}$ раз больше действующего значения фазного напряжения. Кроме того, как следует из векторной диаграммы (рис. 6-5), линейное напряжение U_{AB} на 30° опережает фазное напряжение U_A и на такие же углы линейные напряжения U_{BC} и U_{CA} опережают соответствующие фазные напряжения U_B и U_C. Звезда векторов линейных напряжений повернута на угол 30° в направлении, обратном движению часовой стрелки, относительно звезды векторов фазных напряжений.

Пример 6-1. Определить фазное напряжение генератора, обмотки которого соединены звездой, если линейное напряжение 380 *в*:

$$U_ф = \frac{U_л}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1{,}73} = 220 \text{ в}.$$

6-3. СОЕДИНЕНИЕ ОБМОТОК ГЕНЕРАТОРА ТРЕУГОЛЬНИКОМ

При соединении треугольником к началам фаз генератора A, B, C присоединяются линейные провода (рис. 6-6); конец первой фазы X соединяется с началом второй фазы B, конец второй — Y соединяется с началом третьей фазы C и конец третьей — Z с началом первой фазы A. Следовательно, при соединении треугольником линейные напряжения, т. е. напряжения между проводами линии, равны фазным напряжениям

$$U_{AB} = U_A;\ U_{BC} = U_B \quad \text{и} \quad U_{CA} = U_C. \qquad (6\text{-}5)$$

При соединении треугольником создается замкнутый контур $AXBYCZA$ с малым сопротивлением. Следователь-

но, для предупреждения больших токов в контуре сумма э. д. с., действующих в контуре, должна быть равна нулю.

Сумма трех симметричных э. д. с. равна нулю (рис. 6-7), так как от сложения двух векторов фазных э. д. с., например

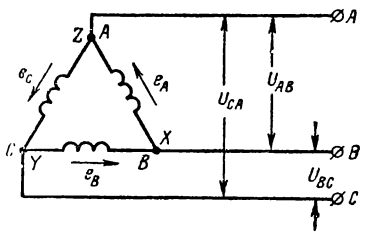


Рис. 6-6. Схема соединения обмоток генератора треугольником.

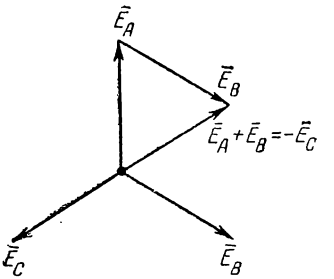


Рис. 6-7. Векторная диаграмма э. д. с. при соединении генератора треугольником.

$\bar{E}_A$ и $\bar{E}_B$, получим вектор $-\bar{E}_C$, равный по величине и обратный по знаку третьему вектору:

$$\bar{E}_A+\bar{E}_B=-\bar{E}_C; \qquad -\bar{E}_C+\bar{E}_C=0.$$

Недопустимо неправильное соединение обмоток генератора треугольником, например, соединив правильно зажимы обмоток X и B (рис. 6-6 и 6-7) и неправильно Y и Z и C с A, получим:

$$\bar{E}_A+\bar{E}_B=-\bar{E}_C; \qquad -\bar{E}_C-\bar{E}_C=-2\bar{E}_C,$$

т. е. сумма э. д. с. в замкнутом контуре в этом случае по величине будет равна удвоенному значению фазной э. д. с., что равносильно короткому замыканию.

6-4. СОЕДИНЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ЭНЕРГИИ ЗВЕЗДОЙ

При соединении приемников энергии звездой трехфазная система может быть четырехпроводной (осветительная нагрузка) или трехпроводной (силовая нагрузка).

В первом случае лампы включаются между каждым из линейных проводов и нейтральным проводом (рис. 6-8).

При этом нейтральный провод обеспечивает равенство напряжений на отдельных фазах приемников и на соответствующих фазах генератора. Таким образом, условия работы приемников энергии остаются теми же, что и в однофазной цепи.

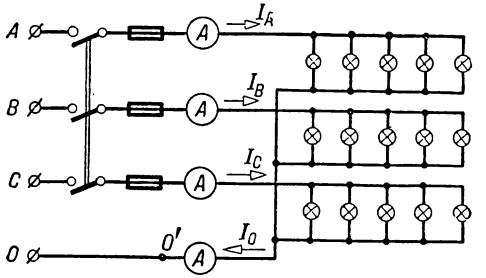


Рис. 6-8. Схема соединения звездой с нейтральным проводом.

При этом соединении (рис. 6-8) токи в линейных проводах равны токам в соответствующих фазах приемника и генератора, т. е.

$$I_ф = I_л. \tag{6-6}$$

Токи в отдельных фазах приемников вычисляются по известным формулам:

$$I_A = \frac{U_A}{z_A}; \qquad I_B = \frac{U_B}{z_B} \quad \text{и} \quad I_C = \frac{U_C}{z_C}.$$

Углы сдвигов фазных токов относительно фазных напряжений приемников определяются через их косинусы:

$$\cos \varphi_A = \frac{r_A}{z_A}; \qquad \cos \varphi_B = \frac{r_B}{z_B}; \qquad \cos \varphi_C = \frac{r_C}{z_C},$$

где r_A, r_B, r_C, z_A, z_B, z_C активные и полные сопротивления фаз приемников.

Мгновенное значение тока в нейтральном проводе, по первому правилу Кирхгофа, равно сумме мгновенных значений фазных токов:

$$i_0 = i_A + i_B + i_C.$$

Вектор тока в нейтральном проводе определяется как сумма векторов фазных токов:

$$\overline{I}_0 = \overline{I}_A + \overline{I}_B + \overline{I}_C. \tag{6-7}$$

Пример 6-2. Фазное напряжение генератора 220 *в*, сопротивление фаз приемника $z_A = z_B = r_A = r_B = 22$ *ом*, $z_C = r_C = 44$ *ом*.

Определить ток в нейтральном проводе.

Фазные токи

$$I_A = I_B = \frac{U_\Phi}{z_A} = \frac{220}{22} = 10 \text{ а}; \qquad I_C = \frac{U_\Phi}{z_C} = \frac{220}{44} = 5 \text{ а}.$$

На векторной диаграмме (рис. 6-9) построены векторы фазных напряжений и токов. Сумма векторов фазных токов дает вектор тока в нейтральном проводе, откуда $I_0 = 5a$. Он отстает по фазе от напряжения U_A на угол $\varphi = 60°$.

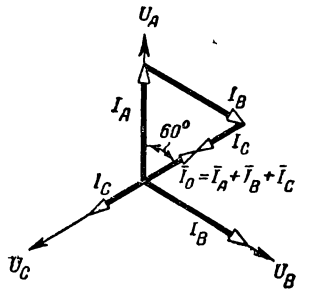


Рис. 6-9. Векторная диаграмма четырехпроводной трехфазной цепи при активной нагрузке.

Сечение нейтрального провода берут равным (или несколько меньшим) сечению линейных проводов, так как ток в нейтральном проводе обычно меньше, чем токи в линейных проводах.

При неодинаковых сопротивлениях фаз приемников, при нейтральном проводе напряжение на каждой фазе приемника равно $U_л/\sqrt{3} = 0{,}58U_л$, которое и является номинальным для приемника. Обрыв нейтрального провода вызовет изменение напряжения на фазах приемников. В фазе приемника с меньшим сопротивлением напряжение уменьшится и может достигнуть нулевого значения при $r_\Phi = 0$. В фазе с бо́льшим сопротивлением напряжение увеличится и может достигнуть значения $U_л$, что недопустимо, так как в $\sqrt{3}$ раз превышает номинальное напряжение приемника, и при осветительной нагрузке лампы, включенные в эту фазу, перегорят. Во избежание разрыва в нейтральном проводе не устанавливают предохранители и выключатели.

При одинаковых сопротивлениях фаз приемника (электродвигатель) и при симметричных фазных э. д. с. генератора фазные токи будут равны между собой и сдвинуты на одинаковые углы от соответствующих фазных напряжений, т. е. система токов также будет симметричной. В этом случае ток в нейтральном проводе, равный сумме фазных токов, равен нулю и, следовательно, необходимость в нем отпадает. Он может быть отсоединен и мы получим трехфазную трехпроводную систему.

Расчет трехфазной цепи при симметричной системе напряжений и одинаковой (равномерной) нагрузке фаз сводится к расчету одной фазы.

Допустим приемник энергии, соединенный звездой, включен в сеть (рис. 6-10). Если сопротивление фаз прием-

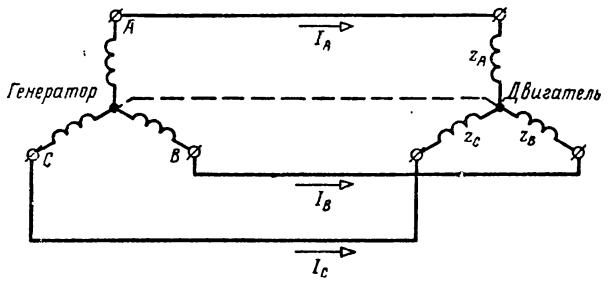


Рис. 6-10. Схема соединения трехфазного генератора и приемника звездой.

ника $z_A = z_B = z_C = z_\Phi$, то фазные напряжения приемника

$$U_A = U_B = U_C = U_\Phi = \frac{U_л}{\sqrt{3}}.$$

Фазные токи

$$I_A = I_B = I_C = I_\Phi = \frac{U_\Phi}{z_\Phi}.$$

Угол сдвига фазного тока от фазного напряжения можно определить через его

$$\cos \varphi_\Phi = \frac{r_\Phi}{z_\Phi},$$

или через его

$$\operatorname{tg} \varphi_\Phi = \frac{x_\Phi}{r_\Phi}.$$

Активная мощность фазы

$$P_\Phi = U_\Phi I_\Phi \cos \varphi_\Phi.$$

Для симметричной системы при равномерной нагрузке активная мощность всех фаз

$$P = 3P_\Phi = 3U_\Phi I_\Phi \cos \varphi_\Phi. \qquad (6\text{-}8)$$

Учитывая, что при соединении звездой $I_ф = I_л$ и $U_ф = \frac{U_л}{\sqrt{3}}$, получим:

$$P = 3U_ф I_ф \cos\varphi_ф = 3\frac{U_л I_л}{\sqrt{3}}\cos\varphi_ф = \sqrt{3}\,UI\cos\varphi. \quad (6\text{-}9)$$

В последней формуле U и I — линейные величины, а φ — угол сдвига фаз между фазным напряжением и фазным током.

Реактивная мощность трехфазной системы

$$Q = \sqrt{3}\,UI\sin\varphi, \quad (6\text{-}10)$$

а кажущаяся мощность

$$S = \sqrt{3}\,UI. \quad (6\text{-}11)$$

При неравномерной нагрузке фаз или при несимметричной системе напряжений мощности трехфазной системы определяются как сумма мощностей трех фаз.

Пример 6-3. Электродвигатель трехфазного тока, соединенный звездой, включен в сеть с напряжением 380 *в*. Мощность двигателя 5 *квт*, ток двигателя 9 *а*. Определить коэффициент мощности.

Мощность электродвигателя

$$P = \sqrt{3}\,UI\cos\varphi,$$

откуда

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3}\,UI} = \frac{5\,000}{1{,}73\cdot 380\cdot 9} = 0{,}84.$$

6-5. СОЕДИНЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ЭНЕРГИИ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

При соединении приемников энергии треугольником (рис. 6-11) каждая фаза приемника присоединяется к линейным проводам, т. е. включается на линейное напряжение, которое одновременно будет и фазным напряжением приемника:

$$U_{AB} = U_A; \qquad U_{BC} = U_B; \qquad U_{CA} = U_C.$$

Таким образом, изменение сопротивления фаз не влияет на фазные напряжения.

Направления линейных токов от генератора к приемнику примем за положительные (рис. 6-11). Направления фазных токов от A' к B', от B' к C' и от C' к A' также примем за положительные.

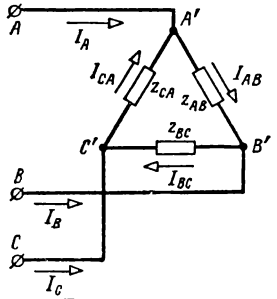


Рис. 6-11. Соединение приемников треугольником.

Согласно первому правилу Кирхгофа для мгновенных значений токов для узла A' можно написать:

$$i_A + i_{CA} = i_{AB},$$

откуда

$$i_A = i_{AB} - i_{CA}.$$

Аналогично для узла B':

$$i_B = i_{BC} - i_{AB}$$

и для узла C':

$$i_C = i_{CA} - i_{BC}.$$

Следовательно, мгновенное значение любого линейного тока равно алгебраической разности мгновенных значений токов тех фаз, которые соединены с данным проводом.

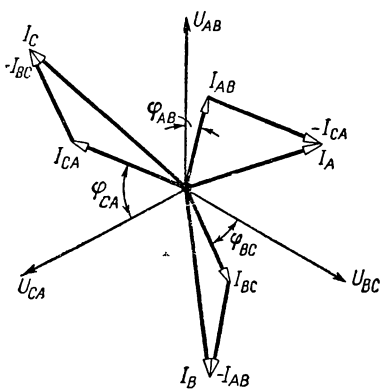


Рис. 6-12. Векторная диаграмма при соединении приемников треугольником.

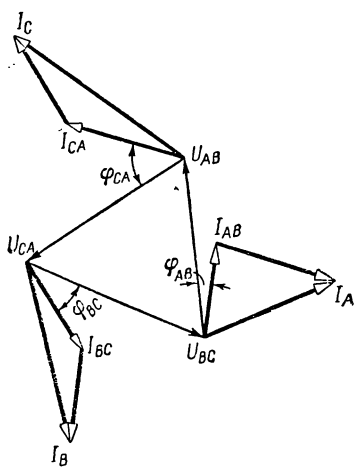


Рис. 6-13. Векторная диаграмма при соединении приемников треугольником.

Вектор любого линейного тока находится как разность векторов соответствующих фазных токов:

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA}; \qquad \bar{I}_B = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB}; \qquad \bar{I}_C = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}.$$

На рис. 6-12 дана векторная диаграмма для трехфазной цепи при соединении приемников энергии треугольником. На этой диаграмме все векторы проведены из одного начала. На рис. 6-13 дана вторая диаграмма для той же цепи, на которой векторы напряжений образуют треугольник, а вектор каждого фазного тока проведен из одного начала с вектором соответствующего фазного напряжения.

Если при симметричной системе линейных напряжений нагрузка фаз равномерная, т. е.

$$z_{AB} = z_{BC} = z_{CA} = z_{\text{ф}}$$

и

$$\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = \varphi_{\text{ф}},$$

то действующие значения фазных токов равны между собой и они сдвинуты по фазам на одинаковые углы от соответствующих напряжений (рис. 6-14) и, следовательно, на углы 120° один относительно другого. Следовательно, фазные токи представляют симметричную систему. Симметричную систему будут представлять и линейные токи (рис. 6-14).

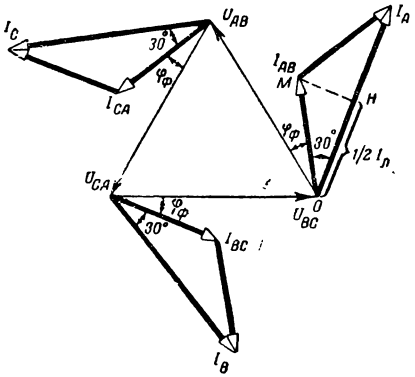


Рис. 6-14. Векторная диаграмма для цепи, соединенной треугольником при равномерной нагрузке фаз.

Восстановив перпендикуляр из середины вектора линейного тока, например I_A, получим прямоугольный треугольник OHM, из которого следует, что

$$\frac{1}{2} I_{л} = I_{\text{ф}} \cos 30° = I_{\text{ф}} \frac{\sqrt{3}}{2}$$

или

$$I_{л} = \sqrt{3}\, I_{\text{ф}}. \qquad (6\text{-}12)$$

Таким образом, при соединении приемников треугольником при равномерной нагрузке фаз линейные токи больше фазных в $\sqrt{3}$ раз.

Кроме того, из той же векторной диаграммы следует, что линейные токи отстают от соответствующих фазных токов на углы 30°.

При соединении приемников треугольником при равномерной нагрузке фаз расчет трехфазной цепи сводится к расчету одной фазы.

В этом случае фазное напряжение $U_ф = U_л$.

Фазный ток

$$I_ф = \frac{U_ф}{z_ф}.$$

Линейный ток

$$I_л = \sqrt{3}\, I_ф.$$

Косинус и тангенс угла сдвига фазного тока относительно фазного напряжения определяются из выражений

$$\cos\varphi = \frac{r_ф}{z_ф}; \qquad \operatorname{tg}\varphi_ф = \frac{x_ф}{r_ф}.$$

Активная мощность одной фазы

$$P_ф = U_ф I_ф \cos\varphi_ф.$$

Активная мощность трех фаз

$$P = 3P_ф = 3U_ф I_ф \cos\varphi_ф = \sqrt{3}\, UI \cos\varphi. \qquad (6\text{-}13)$$

Реактивная мощность трех фаз

$$Q = 3U_ф I_ф \sin\varphi_ф = \sqrt{3}\, UI \sin\varphi. \qquad (6\text{-}14)$$

Кажущаяся мощность трехфазной цепи

$$S = 3U_ф I_ф = \sqrt{3}\, UI. \qquad (6\text{-}15)$$

При неравномерной нагрузке фаз мощность трехфазной цепи определяется как сумма мощностей отдельных фаз.

Пример 6-4. Трехфазный электродвигатель мощностью 4,5 *квт* работает при напряжении 127 *в*. Двигатель соединен треугольником. Определить линейные и фазные токи.

Так как мощность $P = \sqrt{3}\, UI \cos\varphi$, то линейный ток двигателя

$$I_л = \frac{P}{\sqrt{3}\, U \cos\varphi} = \frac{4\,500}{1{,}73 \cdot 127 \cdot 0{,}8} = 25{,}6 \ а.$$

Фазный ток

$$I_ф = \frac{I_л}{\sqrt{3}} = \frac{25{,}6}{1{,}73} = 14{,}8 \ а.$$

Пример 6-5. В сеть трехфазного тока с напряжением $U_л = 125$ *в* включены приемники энергии (рис. 6-15), имеющие сопротивления: $r_{AB} = 10$ *ом* и $r_{BC} = r_{CA} = 15$ *ом*.

Определить напряжения, под которыми будут находиться приемники при перегорании предохранителя в проводе B.

При перегоревшем предохранителе приемники AB и BC окажутся соединенными последовательно и включенными на напряжение $U_л = 125$ *в*.

Ток приемников

$$I_{AB} = I_{BC} = \frac{U_{AC}}{r_{AB} + r_{BC}} = \frac{125}{25} = 5 \text{ а}.$$

Напряжения на зажимах приемников

$$U'_{AB} = I_{AB} r_{AB} = 5 \cdot 10 = 50 \text{ в};$$
$$U_{BC} = I_{BC} r_{BC} = 5 \cdot 15 = 75 \text{ в};$$
$$U_{CA} = U_л = 125 \text{ в}.$$

Если приемники энергии соединены звездой и за положительное направление линейных токов выбрано направление от генератора к потребителю, то согласно первому правилу Кирхгофа для нейтральной точки можно написать:

$$i_A + i_B + i_C = 0.$$

Если приемники энергии соединены треугольником, то сумма линейных токов

$$i_A + i_B + i_C = i_{AB} - i_{CA} + i_{BC} - i_{AB} + i_{CA} - i_{BC} = 0.$$

Следовательно, при любом способе соединения приемников алгебраическая сумма мгновенных значений линейных токов трехфазной цепи равна нулю.

Поэтому, например, намагничивающая сила трех жил трехфазного кабеля равна нулю и, следовательно, не происходит намагничивания стальной брони кабеля, применяемой для защиты от механических повреждений.

6-6. ВКЛЮЧЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ЭНЕРГИИ В СЕТЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Электрические лампы изготовляются на номинальные напряжения 127 и 220 *в*, а трехфазные электродвигатели на номинальные фазные напряжения 127, 220 и 380 *в* и выше.

Способ включения приемника в сеть трехфазного тока зависит от линейного напряжения сети и от номинального напряжения приемника.

Лампы с номинальным напряжением 127 *в* включаются треугольником при линейном напряжении сети 127 *в* и

звездой с нейтральным проводом при линейном напряжении сети 220 *в*. Лампы с номинальным напряжением 220 *в* включаются треугольником в сеть с линейным напряжением 220 *в* и звездой с нейтральным проводом в сеть с линейным напряжением 380 *в*.

Трехфазный электродвигатель включается треугольником в сеть, линейное напряжение которой равно номинальному фазному напряжению электродвигателя. Если линейное напряжение сети превышает в $\sqrt{3}$ раз номинальное фазное напряжение электродвигателя, то он включается звездой.

6-7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ЧЕТЫРЕХПРОВОДНАЯ ЦЕПЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Перед выполнением работы ознакомиться с содержанием § 6-2 и 6-4.

План работы

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения работы. Записать их основные технические данные.

2. Собрать схему (рис. 6-8) и показать ее преподавателю.

3. При отсоединенном нейтральном проводе (OO') установить равномерную нагрузку фаз, измерить фазные и линейные напряжения, напряжение U_0 между точками OO' и линейные токи.

Вычислить фазные мощности P_A, P_B и P_C.

4. При отсоединенном нейтральном проводе, оставляя число ламп в фазах A и B неизменными, изменять нагрузку в фазе C. Измерить фазные и линейные напряжения и линейные токи при различных значениях сопротивления фазы C, включая случаи, когда сопротивление фазы C равно нулю (короткое замыкание фазы) и бесконечности (холостой ход фазы). Вычислить фазные мощности.

5. Показания приборов и результаты расчетов записать в табл. 6-1.

Таблица 6-1

№ наблюдений	r_C	I_A	I_B	I_C	I_0	U_A	U_B	U_C	U_0	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	P_A	P_B	P_C	P
	ом	*а*	*а*	*а*	*а*	*в*	*в*	*в*	*в*	*в*	*в*	*в*	*вт*	*вт*	*вт*	*вт*

6. Для случаев равномерной и неравномерной нагрузок построить векторные диаграммы.

7. Присоединив нейтральный провод, измерить фазные напряжения, линейные напряжения, линейные токи и ток в нейтральном проводе при различных сопротивлениях фазы C, исключая случай короткого замыкания фазы C. Вычислить фазные мощности. Выявить влияние сопротивления нейтрального провода на режим цепи. Показания приборов и результаты расчетов записать в табл. 6-1. Построить векторные диаграммы.

6-8. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ТРЕХПРОВОДНАЯ ЦЕПЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Перед выполнением работы ознакомиться с содержанием § 6-5.

План работы

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для проведения работы. Записать основные технические характеристики измерительных приборов и оборудования.

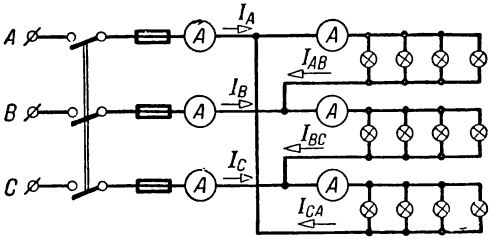


Рис. 6-15. Схема соединения электрических ламп треугольником.

2. Собрать схему (рис. 6-15) и показать ее руководителю.
3. При равномерной нагрузке фаз измерить фазные и линейные токи, убедиться, что $I_л = \sqrt{3} I_ф$. Измерить фазные напряжения и вычислить фазные мощности. Построить векторную диаграмму.
4. Показания приборов и результаты расчетов записать в табл. 6-2.

Таблица 6-2

№ наблюдений	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}	I_A	I_B	I_C	$\frac{I_л}{I_ф}$	P_{AB}	P_{BC}	P_{CA}	P
	в	*в*	*в*	*а*	*а*	*а*	*а*	*а*	*а*	—	*вт*	*вт*	*вт*	*вт*

5. При одинаковых сопротивлениях двух фаз (r_{AB}, r_{BC}) изменять сопротивление третьей фазы. Для каждого опыта записать показания приборов в табл. 6-2. Вычислить фазные мощности. Построить для одного из опытов в масштабе векторную диаграмму.

6. Установить равномерную нагрузку фаз, вынуть вставку предохранителя в фазе C. Записать показания приборов и построить для этого опыта в масштабе векторную диаграмму. Исследовать влияние изменения сопротивления r_{BC} на режим цепи.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ИЗМЕРЕНИЯ

7-1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Измерением называют процесс сравнения измеряемой величины с величиной того же рода, условно принятой за единицу измерения.

Материальный образец единицы измерения ее дробного или кратного значения называется мерой.

Устройство, предназначенное для сравнения измеряемой величины с единицей измерения или с мерой, называют измерительным прибором.

Меры и приборы, предназначенные для практических измерений, считаются рабочими.

Меры и приборы, предназначенные для хранения или воспроизводства единиц, а также для поверки и градуировки приборов, носят название образцовых.

Результат всякого измерения несколько отличается от действительного значения измеряемой величины. Действительное значение измеряемой величины это значение, определяемое при помощи образцовых приборов (образцовых мер).

Разность между измеренным и действительным значением величины составляет абсолютную погрешность измерения. Выраженное в процентах отношение абсолютной погрешности к действительному или измеренному значению представляет собой относительную погрешность, которая применяется для оценки качества измерения.

Пример 7-1. При измерении тока найдено $I_1 = 41$ *а*. Действительное значение тока $I = 40$ *а*.

Абсолютная погрешность измерения

$$\Delta I = I_1 - I = 41 - 40 = 1 \ a.$$

Относительная погрешность

$$\gamma_{изм} = \frac{\Delta I}{I} \cdot 100\% = \frac{1}{40} \cdot 100\% = 2{,}5\%.$$

7-2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Электроизмерительные приборы делятся на приборы непосредственной оценки и приборы сравнения.

К приборам непосредственной оценки, например, относятся: амперметр, ваттметр, счетчик, т. е. приборы, дающие численное значение измеряемой величины по их отсчетному приспособлению.

Прибор сравнения применяется для сравнения измеряемой величины с мерой, например мост для измерения сопротивлений (§ 7-7).

При технических измерениях чаще применяют приборы непосредственной оценки, как более простые, дешевые и требующие мало времени для измерения.

Приборы сравнения используются для более точных измерений.

В табл. 7-1 дано деление электроизмерительных приборов по роду измеряемой величины. В табл. 7-2 дано деление приборов по их системам, т. е. по принципу их устройства и действия.

Разнообразие систем измерительных приборов, обладающих различными свойствами, вызвано разнообразием условий и требований при измерении электрических величин.

По степени точности электроизмерительные приборы (ГОСТ 1845-59) делятся на восемь классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5 и 4. На шкалах приборов число класса точности пишется внутри окружности.

Число класса точности прибора обозначает основную, допустимую, приведенную погрешность прибора. Основной допустимой приведенной погрешностью называется выраженное в процентах отношение наибольшей допускаемой по стандарту абсолютной погрешности прибора (Δx), находящегося в нормальных условиях эксплуатации, к номинальной величине ($x_н$) прибора.

Таблица 7-1

Электроизмерительные приборы и их условные обозначения

Род измеряемой величины	Название прибора	Условное обозначение
Ток	Миллиамперметр, амперметр, килоамперметр	
Напряжение	Милливольтметр, вольтметр, киловольтметр	
Электрическая мощность	Ваттметр, киловаттметр	
Электрическая энергия	Счетчики активной и реактивной энергии	
Сдвиг фаз	Фазометр	
Частота	Частотомер	
Электрическое сопротивление	Омметр, мегомметр	

Прибор находится в нормальных условиях, если установлен в положение, указанное на шкале прибора (табл. 7-2), находится в среде с нормальной температурой (+20° С) и не подвергается действию внешнего магнитного поля (кроме земного).

Номинальной величиной измерительного прибора называется верхний предел измерения его.

Следовательно, приведенная погрешность прибора

$$\gamma_{\text{приб}} = \frac{\Delta x}{x_{\text{н}}} \cdot 100\%. \qquad (7\text{-}1)$$

Погрешность может быть положительной или отрицательной.

Таблица 7-2

Системы электроизмерительных приборов и условные знаки на их шкалах

Знак системы	Система	Знаки на шкалах прибора	Пояснения
	Магнитоэлектрическая	Знаки классов точности	Основные приведенные погрешности, %
	Магнитоэлектрический логометр	(0,05) (0,1) (0,2) (0,5)	0,05; 0,1; 0,2; 0,5
	Выпрямительная	(1) (1,5) (2,5) (4)	1; 1,5; 2,5; 4
		Знаки рода тока	
	Термоэлектрическая	—	Постоянный ток
		~	Переменный ток
	Электромагнитная	≋	Трехфазный ток
	Электродинамическая	Знаки установки прибора	
		⊥	Вертикальное положение шкалы
	Электродинамический логометр	—	Горизонтальное положение шкалы
		∠	Наклонное положение шкалы
	Ферродинамическая	Знаки прочности изоляции прибора	
			Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением 2 *кв*
	Ферродинамический логометр		

Продолжение

Знак системы	Система	Знаки на шкалах прибора	Пояснения
	Индукционная		Генераторный зажим Зажим, соединенный с корпусом
	Электростатическая		Зажим для заземления
	Вибрационная	Пример 	Прибор электромагнитной системы, класса точности 1,5, переменного тока, со шкалой, устанавливаемой под углом 60° к горизонту

Относительной погрешностью при измерении прибором величины x_1 называют выраженное в процентах отношение наибольшей возможной абсолютной погрешности прибора Δx к измеренному значению величины x_1, т. е.

$$\gamma_{x1} = \frac{\Delta x}{x_1} \cdot 100\%. \qquad (7\text{-}2)$$

Умножив и разделив последнее выражение на номинальную величину прибора, получим:

$$\gamma_{x1} = \frac{\Delta x}{x_1} \cdot 100\% \frac{x_н}{x_н} = \frac{\Delta x}{x_н} \cdot 100\% \frac{x_н}{x_1} = \gamma_{приб} \frac{x_н}{x_1}. \qquad (7\text{-}3)$$

Таким образом, погрешность измерения равна погрешности прибора, умноженной на отношение номинальной величины прибора, к измеренному значению.

Пример 7-2. Амперметром с номинальным током $I_н = 25$ *а*, класса точности 1,5 измерен ток $I_1 = 15$ *а*. Определить погрешность при измерении тока.

Наибольшая возможная погрешность при измерении тока

$$\gamma_{I_1} = \gamma \text{ ампер} \frac{I_н}{I_1} = \pm 1{,}5\% \frac{25}{15} = 2{,}5\%.$$

Чем меньше измеряемая величина по сравнению с номинальной величиной прибора, тем больше погрешность измерения этой величины; следовательно, измеряемая величина должна иметь значение не меньше половины номинальной величины прибора.

7-3. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПРИБОРОВ

Измерительный механизм — основная часть каждого измерительного прибора.

При воздействии на измерительный механизм измеряемой или функционально связанной с ней вспомогательной величины происходит перемещение его подвижной части. По углу поворота или по линейному перемещению подвижной части определяется значение измеряемой величины.

а) Магнитоэлектрический измерительный механизм

Подвижная часть магнитоэлектрического измерительного механизма (рис. 7-1) состоит из прямоугольной катушки (рамки) *В*. Обмотка рамки из тонкой изолированной медной проволоки наложена на алюминиевый каркас. На рамке укреплены две полуоси — керны, установленные в опорах. На одной из полуосей укреплены стрелка и концы спиральных пружин, через которые ток подводится к обмотке рамки.

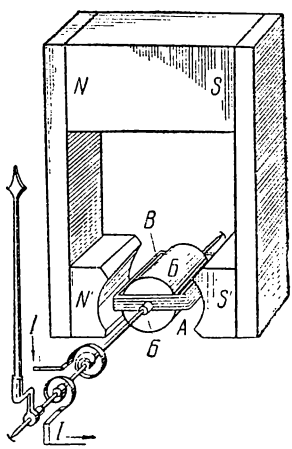


Рис. 7-1. Магнитоэлектрический измерительный механизм.

Боковые стороны рамки расположены в узком воздушном зазоре *А* между неподвижным стальным цилиндром *Б* и полюсными башмаками *N'*,*S'*. Сильный постоянный магнит *N*, *S* создает в воздушном зазоре однородное радиальное магнитное поле.

На боковые стороны обмотки рамки, расположенные в магнитном поле, при наличии тока в обмотке, будет дей-

ствовать пара сил F, F (рис. 7-2). Таким образом, создается вращающий момент, пропорциональный току в рамке,

$$M = kI,$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Под действием этого момента рамка повернется на угол α, при котором вращающий момент уравновесится противодействующим моментом пружин. Последний пропорционален углу закручивания пружин

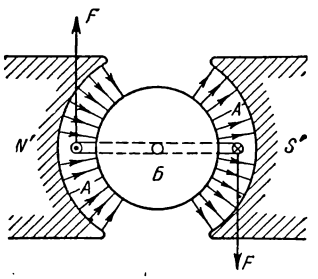


Рис. 7-2. Получение вращающего момента в магнитоэлектрическом измерительном механизме.

$$M_{\text{пр}} = D\alpha,$$

где D — коэффициент пропорциональности.

Из равенства вращающего и противодействующего моментов

$$D\alpha = kI$$

находим выражение угла поворота рамки

$$\alpha = \frac{k}{D} I,$$

из которого следует, что угол поворота пропорционален току.

Ток в катушке измерительного механизма

$$I = \frac{D}{k}\alpha = C\alpha,$$

где $C = \frac{D}{k}$ — постоянная по току, известная для каждого прибора.

Таким образом, измеряемый ток определяется путем отсчета угла поворота рамки и умножения на постоянную прибора. Отсчет угла производится по указательной стрелке и шкале, укрепленной за концом стрелки.

У с п о к о и т е л е м называется приспособление, предназначенное для уменьшения времени колебаний подвижной части, возникающих после включения прибора.

В магнитоэлектрическом измерительном механизме успокоителем является алюминиевый каркас рамки. При повороте подвижной части изменяется магнитный поток, пронизывающий каркас. В каркасе индуктируются токи,

взаимодействие которых с магнитным полем магнита создает тормозной момент, обеспечивающий успокоение.

Рассматриваемый измерительный механизм в связи с малым сечением пружин и проволоки обмотки изготовляется на малые номинальные токи 10—100 *ма* и меньше.

При включении магнитоэлектрического измерительного механизма рассмотренной конструкции в цепь переменного тока вращающий момент будет изменяться пропорционально мгновенному значению тока. При таком быстром изменении момента вследствие инерции подвижная часть не успеет следовать за изменением момента и она отклонится на угол, пропорциональный среднему за период значению вращающего момента. При синусоидальном токе среднее значение тока, а следовательно, и момента равно нулю и подвижная часть не отклонится. Таким образом, рассмотренный измерительный механизм пригоден только для измерений в цепи постоянного тока.

б) Электромагнитный измерительный механизм

Электромагнитный измерительный механизм показан на рис. 7-3. Он состоит из неподвижной катушки *А* и подвижной части — стального сердечника *Б*, указательной стрел-

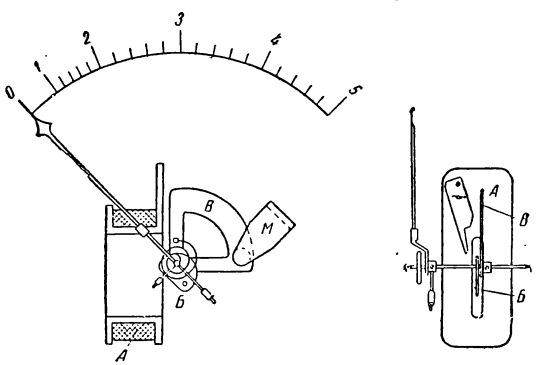


Рис. 7-3. Электромагнитный измерительный механизм.

ки, пружины и секторообразного алюминиевого листка *В* успокоителя, укрепленных на одной оси.

Измеряемый ток, проходя по неподвижной катушке, создает магнитное поле, которое намагничивает сердечник *Б*

и втягивает его внутрь катушки. По углу поворота сердечника определяют величину тока в катушке.

При движении листка *В* успокоителя в магнитном поле магнита *М* в нем индуктируются вихревые токи. Взаимодействием этих токов с полем магнита создается тормозной момент, обеспечивающий успокоение.

Электромагнитный измерительный механизм применим для цепей постоянного и переменного тока, так как втягивание сердечника в катушку не зависит от направления тока.

Вследствие влияния остаточной индукции сердечника втягивание сердечника, а следовательно, и показание измерительного механизма может быть различным при одинаковых значениях тока при увеличении тока и при уменьшении его. Следовательно, возможна погрешность от остаточной индукции. Для уменьшения этой погрешности сердечники изготовляют из пермаллоя, остаточная индукция которого ничтожна.

Для уменьшения погрешности от внешних полей измерительный механизм окружают стальными экранами или кожухами. Для той же цели применяют астатические измерительные механизмы с двумя последовательно соединенными катушками и соответственно с двумя сердечниками на одной оси. Измеряемый ток создает в катушках поля противоположного направления. Внешнее однородное поле уменьшает магнитное поле одной катушки и настолько же увеличивает поле второй катушки, таким образом, результирующее влияние внешнего поля будет ничтожным.

в) Электродинамический измерительный механизм

Электродинамический измерительный механизм (рис. 7-4 и 7-5) состоит из двух катушек — неподвижной *А*, имеющей две секции, и подвижной *Б*, укрепленной на одной оси с указательной стрелкой, крылом *В* воздушного успокоителя и двумя спиральными пружинами.

При прохождении тока I_1 по неподвижной катушке и тока I_2 по подвижной катушке между ними возникает электродинамическое взаимодействие. В результате на подвижную катушку будет действовать пара сил *FF* (рис. 7-5), т. е. вращающий момент. Поворот подвижной катушки происходит до тех пор, пока вращающий момент не уравновесится противодействующим моментом пружин.

При постоянном токе вращающий момент и угол поворота подвижной катушки пропорциональны произведению токов в катушках

$$\alpha = k_1 I_1 I_2. \qquad (7\text{-}4)$$

При переменном токе мгновенный вращающий момент пропорционален произведению мгновенных значений токов, а средний за период вращающий момент и пропорциональный ему угол поворота подвижной катушки определяются произведением действующих значений токов в катушках и косинусу угла сдвига между ними, т. е.

$$\alpha = k_1 I_1 I_2 \cos \psi. \qquad (7\text{-}5)$$

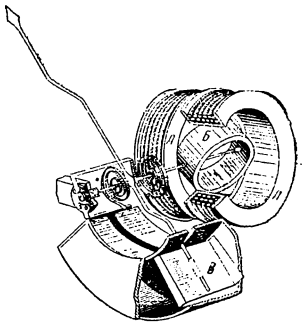


Рис. 7-4. Электродинамический измерительный механизм.

По этому углу поворота, как будет показано ниже, определяют значение измеряемой величины.

Отсутствие стали в измерительном механизме, а следовательно, и погрешности от остаточной индукции обеспечивают возможность изготовить эти механизмы для измерений высокой точности.

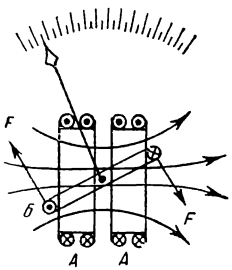


Рис. 7-5. Получение вращающего момента в электродинамическом измерительном механизме.

Для уменьшения погрешностей от внешних магнитных полей, обусловленных слабым магнитным полем измерительного механизма, применяются те же средства, что и для электромагнитных измерительных механизмов.

Слабому магнитному полю соответствует слабый вращающий момент и, следовательно, для получения высокой точности необходимо уменьшить погрешность от трения. Это достигается уменьшением веса подвижной части и безупречной обработкой осей и опор. Кроме того, поперечное сечение пружин и провода подвижной катушки мало, поэтому электродинамический измерительный механизм чувствителен к перегрузке.

г) Ферродинамический измерительный механизм

Принцип работы этого измерительного механизма тот же, что и электродинамического. Он отличается от последнего наличием стального сердечника из листовой стали, на который наложена неподвижная катушка, и неподвижного цилиндра из той же стали, который охватывается подвижной катушкой (рис. 7-6).

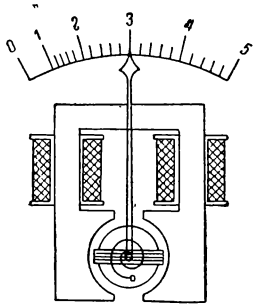


Рис. 7-6. Ферродинамический измерительный механизм.

Стальной магнитопровод усиливает поле измерительного механизма, вследствие чего увеличивается вращающий момент, что приводит к более прочной конструкции и уменьшает влияние внешних магнитных полей на показание измерительного механизма. Применение стали увеличивает погрешности от остаточной индукции и вихревых токов в магнитопроводе.

7-4. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

а) Схемы включения амперметра и вольтметра

Показание амперметра определяется током в его измерительном механизме. Поэтому для измерения тока в каком-либо участке электрической цепи, приемнике или генераторе амперметр надо включить так, чтобы измеряемый ток проходил через него. Следовательно, амперметр включается последовательно с приемником, генератором или участком цепи (рис. 7-7).

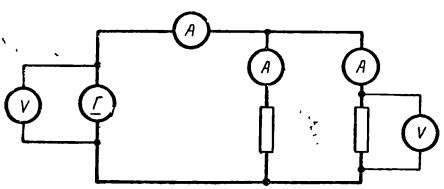


Рис. 7-7. Включение амперметров и вольтметров.

Включение амперметра не должно изменить режим работы цепи, следовательно, сопротивление его должно быть малым по сравнению с сопротивлением приемника или участка цепи. При малом сопротивлении амперметра ($r_а$) и номинальном токе его ($I_{а,н}$) мала и номинальная мощность потерь в нем

$$P_{а.н} = I^2_{а.н} r_а.$$

Если измеряемый ток больше номинального тока измерительного механизма (амперметра), то для расширения предела измерения тока в цепях постоянного тока применяют ш у н т ы, рассмотренные ниже, а в цепях переменного тока — т р а н с ф о р м а т о р ы т о к а (§ 9-10).

Показание вольтметра определяется напряжением на его зажимах. Поэтому для измерения напряжения на зажимах приемника или генератора необходимо его зажимы соединить с зажимами вольтметра, т. е. присоединить вольтметр п а р а л л е л ь н о потребителю или генератору (рис. 7-7).

Сопротивление вольтметра должно быть большим по сравнению с сопротивлением приемника энергии (генератора), параллельно которому он включается с тем, чтобы его включение не влияло на измеряемое напряжение (на режим работы цепи). При большом сопротивлении вольтметра ($r_в$) номинальный ток его ($I_{в.н}$) мал, мала и номинальная мощность потерь в нем ($P_{в.н}$), так как

$$I_{в.н} = \frac{U_{в.н}}{r_в} \quad \text{и} \quad P_{в.н} = \frac{U^2_{в.н}}{r_в}.$$

Напряжение на зажимах измерительного механизма

$$U_и = I_и r_и.$$

Так как сопротивление медной обмотки измерительного механизма $r_и$ изменяется на 4% при изменении температуры на 10° С, то напряжение $U_и$ не пропорционально току $I_и$, а следовательно, и углу поворота подвижной части. Таким образом, точное измерение напряжения невозможно.

Включив последовательно с измерительным механизмом большое д о б а в о ч н о е с о п р о т и в л е н и е ($r_д \gg r_и$) из манганина, температурный коэффициент которого близок к нулю, получим сопротивление вольтметра $r_в = r_и + r_д$ практически независимым от температуры.

Таким образом, угол поворота подвижной части вольтметра будет пропорционален не только току, но и напряжению на зажимах

$$U_в = I_И (r_И + r_д) = I_И r_в = I_И \text{ const.} \qquad (7\text{-}6)$$

Добавочное сопротивление, кроме того, применяется для увеличения номинального напряжения вольтметра, так как номинальное напряжение измерительного механизма обычно мало.

Для расширения предела измерения напряжения в цепях переменного тока высокого напряжения наряду с добавочным сопротивлением применяют измерительные трансформаторы напряжения (§ 9-10).

Из изложенного следует, что амперметр и вольтметр могут иметь измерительные механизмы одинакового устройства, отличающиеся только своими параметрами. Но амперметр и вольтметр по-разному включаются в измеряемую цепь и имеют разные внутренние измерительные схемы.

б) *Магнитоэлектрические амперметры и вольтметры*

Выше указывалось, что наибольший номинальный ток, на который изготовляются магнитоэлектрические измерительные механизмы, не превышает 100 *ма*. Таким образом, магнитоэлектрические приборы для измерения малых токов (гальванометры, микроамперметры, миллиамперметры) представляют собой измерительный механизм, катушка которого присоединена к зажимам прибора, расположенным на его корпусе, а на шкалах непосредственно наносятся значения измеряемого тока.

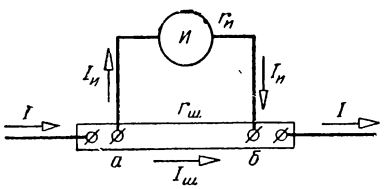


Рис. 7-8. Измерительный механизм с шунтом.

Магнитоэлектрический амперметр представляет собой измерительный механизм той же системы с шунтом для расширения предела измерения тока. Шунт присоединяется параллельно измерительному механизму (рис. 7-8).

Измеряемый ток в узле *а* делится на две части: ток шунта $I_ш$ и ток измерительного механизма $I_И$. Падение напряжения на разветвлении *аб* (рис. 7-8)

$$U_{аб} = I_И r_И = I \frac{r_И r_ш}{r_И + r_ш},$$

откуда

$$I = I_И \frac{r_И + r_ш}{r_ш} = I_И p. \qquad (7\text{-}7)$$

При постоянных значениях сопротивления шунта $r_ш$ и сопротивлении измерителя $r_И$ между измеряемым током I и током измерительного механизма $I_И$ будет постоянное отношение p. Следовательно, по углу поворота подвижной части измерительного механизма можно определять измеряемый ток. Шунты должны иметь достаточное сечение, исключающее возможность их нагревания и связанных с этим погрешностей. Шунты на токи до 25—50 *а* обычно помещаются в кожухе прибора, а на большие токи — вне прибора, отдельно от него.

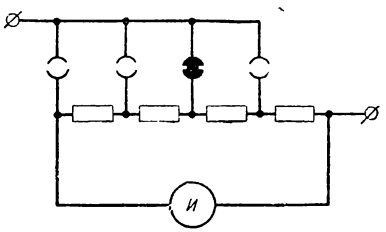


Рис. 7-9. Амперметр с многопредельным шунтом.

Технические амперметры имеют однопредельные шунты, а образцовые и лабораторные — многопредельные (рис. 7-9). Различные пределы измерения получаются изменением сопротивления шунта при перестановке штепселя из одного гнезда в другое.

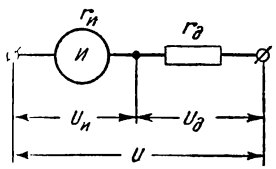


Рис. 7-10. Измерительный механизм с добавочным сопротивлением.

Магнитоэлектрический вольтметр представляет собой измерительный механизм той же системы с добавочным сопротивлением для расширения предела измерения напряжения (рис. 7-10).

На шкале вольтметра наносятся деления, дающие значения напряжения на его зажимах:

$$U = I (r_И + r_д),$$

которое больше напряжения на измерительном механизме $U_И = Ir_И$ в $p = \frac{r_И + r_д}{r_И}$ раз.

Технические вольтметры имеют однопредельное, а образцовые и лабораторные — многопредельные добавочные сопротивления (рис. 7-11). Различные номинальные напряжения получаются использованием различных добавочных

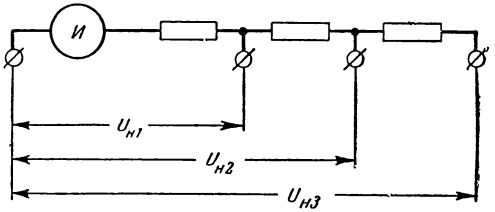


Рис. 7-11. Вольтметр с многопредельным добавочным сопротивлением.

сопротивлений, что достигается переносом одного из проводов с одного зажима вольтметра на другой, или переключением переключателя или штепселя.

Магнитоэлектрические амперметры и вольтметры изготовляются как образцовые и лабораторные (класс точности 0,1—0,5), так и технические (класс 1—2,5).

Они обладают высокой чувствительностью, малым влиянием внешних магнитных полей, незначительным влиянием температуры, малой мощностью потерь, чувствительностью к перегрузкам.

в) *Выпрямительные амперметры и вольтметры*

Выпрямительные амперметры представляют собой сочетание магнитоэлектрического измерительного механизма с полупроводниковым выпрямителем (рис. 7-12).

В течение одного полупериода ток идет по пути *а—б—г—в*, в течение второго полупериода по пути *в—б—г—а*. Следовательно, через измерительный механизм в течение каждого полупериода переменного тока проходит полуволна тока одного и того же направления. Средний вращающий момент и угол поворота подвижной части зависят от среднего тока, а этот последний при синусоидальном токе пропорционален

действующему значению тока, значения которого и наносятся на шкале амперметра.

Расширение предела измерения тока достигается применением шунта.

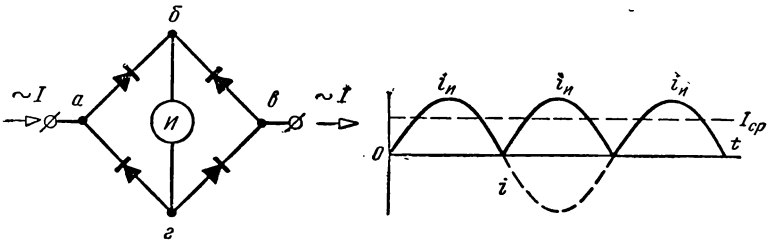


Рис. 7-12. Схема выпрямительного амперметра и кривая тока в измерительном механизме.

Выпрямительные вольтметры представляют собой сочетание магнитоэлектрического измерительного механизма с полупроводниковым выпрямителем и добавочным сопротивлением (рис. 7-13).

Угол поворота подвижной части, как и у амперметра, при синусоидальной измеряемой величине пропорционален действующему значению тока, а при постоянном сопротивлении вольтметра — действующему значению напряжения, которые и наносятся на шкале вольтметра.

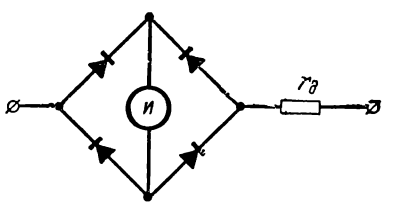


Рис. 7-13. Схема выпрямительного вольтметра.

Выпрямительные амперметры и вольтметры имеют класс точности 1,5—2,5. Они применяются главным образом в цепях переменного тока повышенной частоты до 10 *кгц*.

г) *Термоэлектрические амперметры и вольтметры*

Термоэлектрический амперметр представляет собой сочетание магнитоэлектрического измерительного механизма с термопреобразователем (рис. 7-14), а вольтметр, кроме того, имеет добавочное сопротивление.

Два сваренных конца двух проводов из разных металлов называются термопарой. Несваренные концы термопары называются свободными, сваренные — рабочими.

При нагреве рабочих концов термопары на свободных концах появится разность потенциалов, называемая термоэлектродвижущей силой — термо-э. д. с. Термо-э. д. с. зависит от металлов, образующих термопару, и разности температур между рабочими и свободными концами термопары, а при постоянной температуре свободных концов — от температуры рабочего конца термопары.

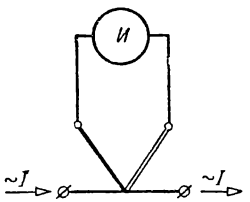


Рис. 7-14. Термоэлектрический амперметр.

Приварив к рабочему концу термопары проводник — нагреватель, получим термопреобразователь.

При прохождении переменного тока по нагревателю он нагревается, нагревает рабочий конец термопары и на свободных концах ее появится термо-э. д. с. Если к этим концам присоединен измерительный механизм, то в нем появится ток и подвижная часть повернется на угол, зависящий как от термо-э. д. с., так и от измеряемого переменного тока, проходящего по нагревателю. На шкале амперметра наносятся действующие значения тока.

Вольтметр отличается от амперметра добавочным сопротивлением, соединенным последовательно с нагревателем термопреобразователя. В этом случае угол поворота подвижной части зависит не только от тока, но и от напряжения на зажимах вольтметра. На шкале наносится действующее значение этого напряжения.

Точность термоэлектрических приборов соответствует классам 1,5—2,5.

Термоэлектрические приборы применяются в цепях переменного тока повышенной и высокой частоты (до 10—50 *Мгц*).

д) *Электромагнитные амперметры и вольтметры*

Показание электромагнитного измерительного механизма зависит от тока в его катушке, значения которого и наносятся на шкале амперметра. Катушка электромагнитного

амперметра неподвижна, вес ее не влияет на погрешность от трения, поэтому она может быть изготовлена из провода любого сечения и, следовательно, на любой номинальный ток. Щитовые амперметры изготовляются нашими заводами на номинальный ток до 300 *а*.

Электромагнитный вольтметр состоит из одноименного измерительного механизма на номинальный ток 20—30 *ма* и последовательно соединенного с ним добавочного сопротивления из манганина (рис. 7-10).

Добавочное сопротивление — активное и несоизмеримо больше реактивного сопротивления катушки измерительного механизма, поэтому общее сопротивление вольтметра практически активное и мало зависит от рода тока и частоты.

При постоянном сопротивлении вольтметра угол поворота подвижной части зависит не только от тока в катушке, но и пропорционального ему напряжения на зажимах вольтметра, значения которого и наносятся на шкале прибора.

Электромагнитные амперметры и вольтметры широко применяются в установках переменного тока технической частоты как щитовые приборы классов точности 1,5—2,5. Наша промышленность наряду с техническими приборами выпускает также переносные амперметры и вольтметры для постоянного и переменного тока класса точности 0,5.

в) *Электродинамические и ферродинамические амперметры и вольтметры*

Электродинамический амперметр представляет собой измерительный механизм того же названия, катушки которого соединены последовательно или параллельно в зависимости от его номинального тока, а на шкале нанесены деления, соответствующие значениям тока, проходящего по амперметру.

Подвижная катушка для уменьшения погрешности от трения делается легкой из провода малого сечения на номинальный ток не выше 100 *ма*. Неподвижную катушку изготовляют из провода разного сечения в зависимости от номинального тока, который может быть 5 *а* и выше. Поэтому в миллиамперметрах катушки соединяются последовательно (рис. 7-15), а в амперметрах — параллельно (рис. 7-16).

При последовательном соединении катушек токи в них одинаковы и совпадают по фазе, следовательно, угол по-

ворота подвижной части прибора пропорционален квадрату тока

$$\alpha = k_1 I_1 I_2 \cos \psi = k_2 I^2. \qquad (7\text{-}8)$$

При параллельном соединении катушек амперметра и постоянных сопротивлениях ветвей каждый из токов катушек I_1 и I_2 пропорционален измеряемому току I. Если,

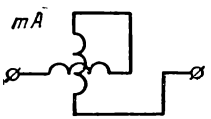


Рис. 7-15. Схема электродинамического миллиамперметра.

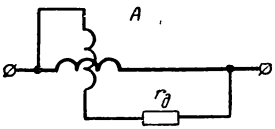


Рис. 7-16. Схема электродинамического амперметра.

кроме того, активные и реактивные сопротивления ветвей подобраны так, что токи I_1 и I_2 совпадают по фазам ($\psi = 0$), то как и в предыдущем случае угол поворота подвижной части амперметра будет пропорционален квадрату измеряемого тока, т. е.

$$\alpha = k_1 I_1 I_2 \cos \psi = k_2 I^2.$$

Электродинамические вольтметры состоят из измерительного механизма того же названия, катушки которого изготовлены из провода малого сечения на номинальный ток 20—50 *ма* и соединены последовательно между собой и с добавочным сопротивлением (рис. 7-17).

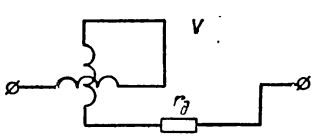


Рис. 7-17. Схема электродинамического вольтметра.

Добавочное сопротивление предназначено для расширения предела измерения напряжения и уменьшения влияния температуры, рода тока и частоты на показание вольтметра.

Электродинамические амперметры и вольтметры изготовляются в качестве образцовых и лабораторных приборов (класс точности 0,1—0,5) для цепей переменного тока стандартной и повышенной частоты до 2 000 *гц*.

Электродинамические приборы обладают высокой точностью и пригодны для постоянного и переменного тока.

Они чувствительны к перегрузкам и к влиянию внешних магнитных полей.

Ферродинамические амперметры и вольтметры имеют те же внутренние измерительные схемы, что и электродинамические приборы. Они применяются главным образом как самопишущие приборы для цепей переменного тока. Ферродинамические приборы обладают невысокой точностью (класс точности 1,5—2,5), большим вращающим моментом, прочной и надежной конструкцией. Они практически не чувствительны к влиянию внешних магнитных полей

7-5. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ

Мощность P цепи постоянного тока можно определить, измеряя амперметром и вольтметром ток I и напряжение цепи U, так как

$$P = UI.$$

Удобнее и точнее измерять мощность цепи постоянного тока электродинамическим ваттметром.

Электродинамический ваттметр состоит из измерительного механизма того же названия (§ 7-3, в). Неподвижная катушка ваттметра (рис. 7-18), называемая последовательной или токовой, соединяется последовательно с приемником энер-

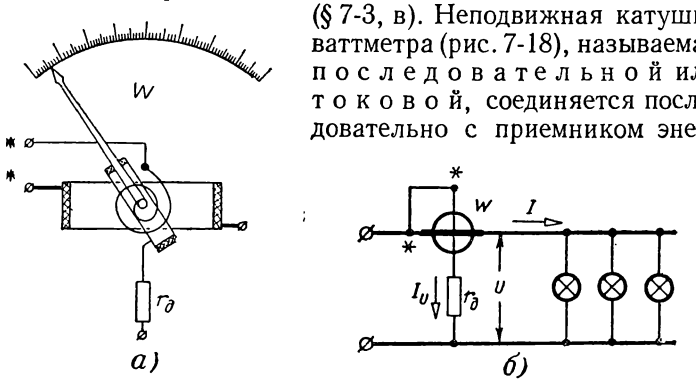


Рис. 7-18. Схемы устройства (*а*) и соединения (*б*) электродинамического ваттметра.

гии. Подвижная катушка и добавочное сопротивление $r_д$ образуют параллельную цепь или цепь напряжения ваттметра, которая присоединяется параллельно приемнику энергии, мощность которого измеряется.

Угол поворота подвижной части электродинамического измерительного механизма, включенного в цепь постоянного тока, пропорционален произведению тока I последовательной катушки и тока I_U катушки напряжения (7-4), так что

$$\alpha = k_1 I I_U.$$

Добавочное сопротивление обеспечивает постоянство сопротивления цепи напряжения, вследствие чего ток в параллельной цепи пропорционален напряжению ($I_U = U/r_U$) и, следовательно,

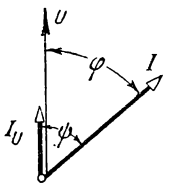


Рис. 7-19. Векторная диаграмма электродинамического ваттметра.

$$\alpha = k_1 I I_U = k_1 I \frac{U}{r_U} = k_3 I U = k_3 P. \quad (7\text{-}9)$$

Таким образом, угол поворота подвижной части пропорционален мощности, значения которой и наносятся на шкале ваттметра.

Для измерения активной мощности в цепи переменного тока

$$P = UI \cos \varphi$$

применяются электродинамические и ферродинамические ваттметры.

В этом случае угол поворота подвижной части измерительного механизма (7-5):

$$\alpha = k_1 I I_U \cos \psi.$$

При постоянном и практически безреактивном сопротивлении параллельной цепи ваттметра ток в ней $I_U = U/r_U$ пропорционален напряжению и совпадает с ним по фазе (рис. 7-19). Таким образом, угол сдвига ψ между токами в катушках равен углу сдвига φ между напряжением U и током I в последовательной катушке ваттметра.

Угол поворота подвижной части

$$\alpha = k_1 I I_U \cos \psi = k_1 I \frac{U}{r_U} \cos \varphi = k_3 I U \cos \varphi = k_3 P, \quad (7\text{-}10)$$

т. е. он пропорционален активной мощности.

Зажим последовательной обмотки ваттметра, соединяемый проводом с источником питания, называется г е н е р а т о р н ы м зажимом, зажим параллельной цепи, соединяемый с проводом, в который включена токовая катушка ватт-

метра, также носит название генераторного. Генераторные зажимы на схемах и на приборах отмечаются звездочкой (*).

При сборке схемы следует обращать внимание на разметку зажимов ваттметра, так как, поменяв местами зажимы какой-либо катушки ваттметра, изменим направление тока или изменим на половину периода фазу тока этой катушки, вследствие чего подвижная часть повернется в обратную сторону.

Измерение мощности в цепях переменного тока с токами выше 5 *а* и напряжением выше 220 *в* производится обычно ваттметрами, включаемыми через измерительные трансформаторы (§ 9-10).

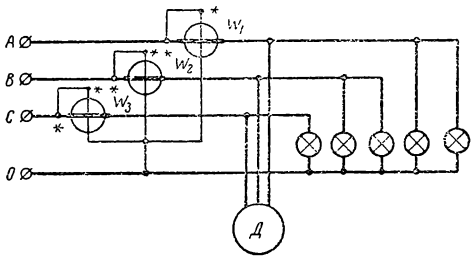


Рис. 7-20. Схема соединения для измерения мощности в четырехпроводной трехфазной цепи.

Измерение активной мощности четырехпроводной цепи трехфазного тока

$$P = P_A + P_B + P_C = \\ = I_A U_A \cos\varphi_A + I_B U_B \cos\varphi_B + I_C U_C \cos\varphi_C \qquad (7\text{-}11)$$

производится тремя ваттметрами, соединенными так, чтобы каждый из них измерял мощность отдельной фазы (рис. 7-20). Сумма показаний ваттметров дает искомую величину.

Удобней пользоваться трехэлементным ваттметром, который состоит из трех неподвижных и трех подвижных катушек, укрепленных на одной оси с указательной стрелкой. На шкале прибора наносятся значения мощности трехфазной цепи.

В трехфазной трехпроводной цепи при равномерной нагрузке можно измерить мощность одной фазы и, умножив ее на три, получить мощность трехфазной цепи. На рис. 7-21

дана схема соединения для измерения мощности двигателя при доступной нулевой точке.

На рис. 7-22 дана схема соединения ваттметра для измерения мощности двигателя при соединении треугольником.

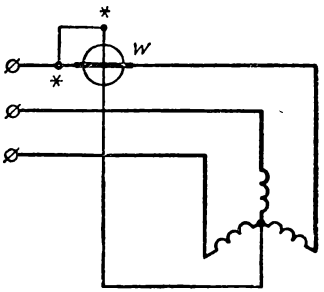


Рис. 7-21. Схема соединения для измерения мощности двигателя при доступной нулевой точке.

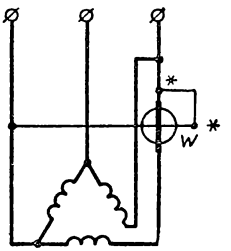


Рис. 7-22. Схема соединения для измерения мощности двигателя при соединении его треугольником.

Мощность трехфазной трехпроводной цепи, нагрузка которой может быть как равномерной, так и неравномерной, измеряется двухэлементным ваттметром. Двухэлементный электродинамический или ферроди-

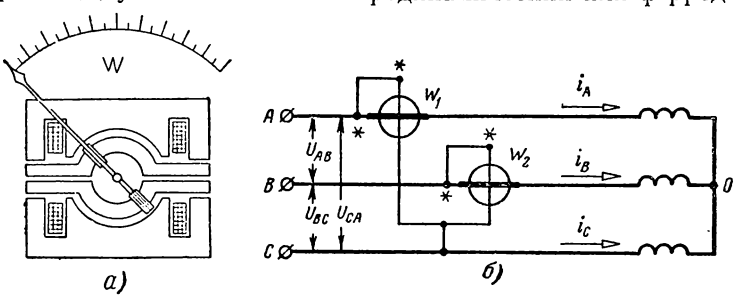


Рис. 7-23. Схема устройства (*а*) и схема соединения (*б*) двухэлементного ваттметра для измерения мощности в цепи трехфазного тока.

намический ваттметр имеет две неподвижных катушки тока и соответственно две подвижных катушки напряжения, укрепленные на одной оси со стрелкой (рис. 7-23, *а*).

Мгновенная мощность трехфазной цепи

$$p = p_A + p_B + p_C = i_A u_A + i_B u_B + i_C u_C, \qquad (7\text{-}12)$$

где p_A, p_B, p_C — мгновенные мощности отдельных фаз. Для нулевой точки приемника можно написать

$$i_A + i_B + i_C = 0,$$

откуда

$$i_C = -i_A - i_B. \qquad (7\text{-}13)$$

Подставив (7-13) в выражение мощности, получим:

$$p = i_A u_A + i_B u_B - i_A u_C - i_B u_C =$$
$$= i_A (u_A - u_C) + i_B (u_B - u_C) = i_A u_{AC} + i_B u_{BC} = p_1 + p_2, \qquad (7\text{-}14)$$

так как разность фазных напряжений равна линейному напряжению

$$u_A - u_C = u_{AC} \quad \text{и} \quad u_B - u_C = u_{BC}.$$

Таким образом, мгновенную мощность трехфазной цепи можно представить суммой двух слагающих p_1 и p_2.

Включим двухэлементный ваттметр (рис. 7-23, *б*) в соответствии с выражением 7-14. Последовательную обмотку первого элемента включим в рассечку провода A (ток i_A), а его параллельную цепь — между проводами A и C (напряжение u_{AC}), последовательную обмотку второго элемента включим в рассечку провода B (ток i_B), а его параллельную цепь — между проводами B и C (напряжение u_{BC}). В этом случае мгновенный вращающий момент, действующий на подвижную часть ваттметра, пропорционален мгновенной мощности трехфазной цепи. Угол поворота подвижной части, пропорциональный среднему вращающему моменту, будет пропорционален средней или активной мощности трехфазной цепи, которая в соответствии с выражением 7-14 может быть записана:

$$P = I_A U_{AC} \cos \varphi_{A-AC} + I_B U_{BC} \cos \varphi_{B-BC}, \qquad (7\text{-}15)$$

где φ_{A-AC} — угол сдвига между I_A и U_{AC}, а φ_{B-BC} между I_B и U_{BC}.

При монтаже схемы ваттметра генераторные зажимы последовательных катушек должны быть соединены с проводами, идущими от источника питания, а генераторные зажимы параллельных цепей с проводами, обозначенными буквами, стоящими на первом месте в индексах соответ-

ствующих напряжений (в нашем случае A и B). Рассмотренная схема пригодна и для цепи с приемниками, соединенными треугольником, так как всякий треугольник можно заменить звездой с той же активной мощностью.

Две последовательные катушки ваттметра можно включать не только в провода A и B, а в два произвольно выбранных провода трехфазной цепи. Генераторный зажим каждой параллельной цепи ваттметра должен быть присоединен к линейному проводу, в котором включена последовательная катушка «своего» элемента. Негенераторные зажимы параллельных цепей присоединяются к линейному проводу, в котором нет последовательной катушки ваттметра.

При отсутствии двухэлементного ваттметра можно использовать два однофазных ваттметра, соединяя их по той же схеме (рис. 7-23, *б*). Для получения активной мощности трехфазной цепи складывают алгебраически их показания. Если стрелка одного из ваттметров отклонится в обратную сторону, то зажимы параллельной цепи этого ваттметра следует поменять местами, а показание его считать отрицательным.

7-6. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Для измерения электрической энергии применяются счетчики электроэнергии. Из различных систем счетчиков наибольшее распространение получили *электродинамические счетчики* для цепей постоянного тока и *индукционные счетчики* для цепей переменного и трехфазного тока.

Электрические счетчики представляют собой *суммирующие* приборы. Основное отличие их от показывающих приборов заключается в том, что угол поворота их подвижной части не ограничивается пружиной. С течением времени угол поворота нарастает, показание счетчика суммируется, причем каждому обороту подвижной части его соответствует определенное значение измеряемой величины.

Однофазный индукционный счетчик (рис. 7-24) состоит из алюминиевого диска, укрепленного на оси, и двух электромагнитов: последовательного A и параллельного $Б$.

Ток потребителя I, проходя по обмотке электромагнита A, возбуждает магнитный поток Φ_I, пропорциональный току I. Ток в обмотке параллельного электромагнита воз-

буждает магнитный поток Φ_U, пропорциональный напряжению сети U. Эти магнитные потоки, пронизывая диск, наводят в нем вихревые токи I_A и $I_Б$. Ток $I_A \equiv \Phi_I \equiv I$, а ток $I_Б \equiv \Phi_U \equiv U$. От взаимодействия тока I_A с магнитным потоком Φ_U и тока $I_Б$ с потоком Φ_I создается вращающий момент, пропорциональный мощности потребителя:

$$M = k_1 IU \cos \varphi = k_1 P. \qquad (7\text{-}16)$$

Этот момент вызывает вращение диска счетчика. При вращении диска в поле постоянного тормозного магнита M

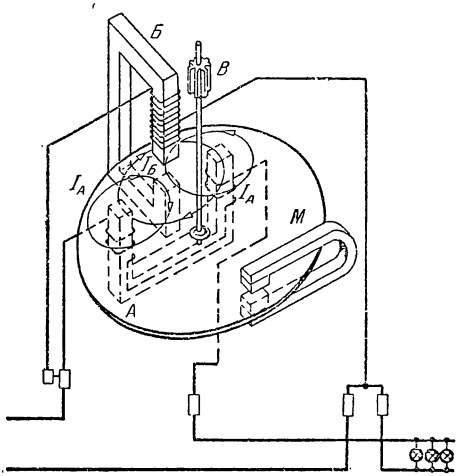


Рис. 7-24. Схема устройства и включения индукционного счетчика.

в диске индуктируются вихревые токи (рис. 3-20), взаимодействие которых с полем того же магнита M создает тормозной момент, пропорциональный скорости вращения диска счетчика n, т. е.

$$M_т = k_2 n. \qquad (7\text{-}17)$$

Постоянной нагрузке соответствует и постоянная скорость вращения счетчика, так как при этом имеет место равенство вращающего и тормозного моментов

$$M = M_т,$$

а следовательно,

$$k_1 P = k_2 n,$$

откуда следует, что

$$P = \frac{k_2}{k_1} n = kn,$$

т. е. скорость вращения счетчика пропорциональна мощности потребителя.

При мощности потребителя P в течение времени t, израсходованная им энергия

$$W = Pt = knt = kN. \qquad (7\text{-}18)$$

Таким образом, израсходованная энергия пропорциональна числу оборотов диска счетчика N.

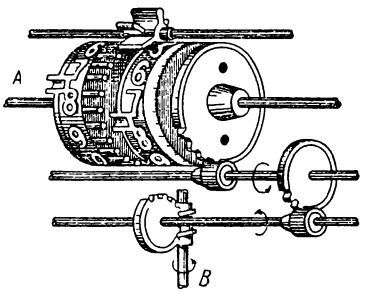


Рис. 7-25. Схема счетного механизма.

Коэффициент

$$k = \frac{W}{N}, \qquad (7\text{-}19)$$

называемый постоянной счетчика, численно равен количеству энергии, израсходованной в сети за время одного оборота диска счетчика.

Израсходованная энергия регистрируется счетным механизмом (рис. 7-25), приводимым в движение от червячной передачи (или шестеренки) B, укрепленной на оси счетчика. Движение диска передается пяти роликам, на боковых поверхностях которых нанесены цифры от 0 до 9. Ролики свободно надеты на ось A. Первый (на рис. 7-25 — правый) скреплен с шестеренкой и при движении диска счетчика беспрерывно вращается. Один оборот первого ролика вызывает поворот второго ролика на $^1/_{10}$ часть оборота. Один оборот второго — вызывает поворот третьего ролика также на $^1/_{10}$ часть оборота и т. д. Ролики прикрыты алюминиевым щитком, через отверстия в котором видно только по одной цифре каждого ролика. Прочитанное через отверстия в щитке числовое значение дает величину энергии, учтенную счетчиком за весь период его работы с того момента, когда показания его соответствовали нулевому значению.

Для определения энергии, израсходованной за какой-то промежуток времени, нужно из показания счетчика в конце измерения вычесть показание, снятое в начале.

Согласно ГОСТ 6570-60 счетчики активной энергии делятся на классы точности 1, 2 и 2,5, а счетчики реактивной энергии — на классы 2 и 3.

Для измерения электрической энергии в трехфазных четырехпроводных цепях применяется трехэлементный счетчик. Он имеет три электромагнитные системы такие же, как и у однофазного счетчика, которые воздействуют на три диска, укрепленные на одной оси. Счетчик имеет один счетный механизм. Схема включения счетчика принципиально та же, что и трехэлементного ваттметра (рис. 7-20).

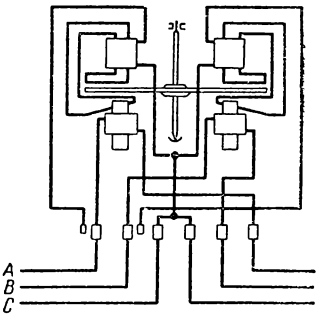


Рис. 7-26. Схема устройства и включения двухэлементного однодискового счетчика.

Для измерения энергии в трехфазных трехпроводных цепях применяются двухэлементные двухдисковые или однодисковые счетчики (рис. 7-26).

Двухэлементный счетчик можно заменить двумя однофазными счетчиками (парные счетчики). Схема включения

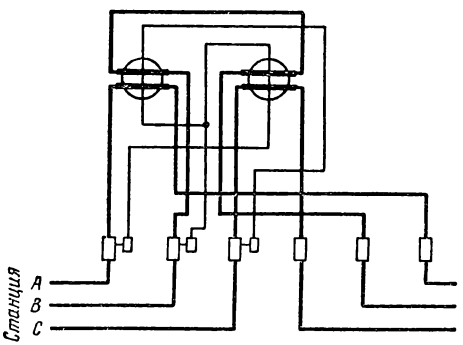


Рис. 7-27. Схема соединения счетчика реактивной энергии типа ИР.

двухэлементного и парных счетчиков принципиально та же, что и двухэлементного ваттметра (рис. 7-23, *б*).

Измерение реактивной энергии трехфазного тока производится реактивными счетчиками, например типа ИР, схема которого дана на рис. 7-27.

Этот счетчик — индукционный двухэлементный, имеющий по две обмотки на каждом из последовательных электромагнитов. Эти обмотки создают в сердечниках такие по величине и фазе магнитные потоки, которые совместно с потоками параллельных электромагнитов обеспечивают получение вращающего момента, пропорционального реактивной мощности. Счетный механизм непосредственно учитывает реактивную энергию.

Расширение пределов измерения тока и напряжения ваттметров и счетчиков производится при помощи измерительных трансформаторов (§ 9-10).

7-7. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ

а) *Мост для измерения сопротивления*

Мерой электрического сопротивления, т. е. образцом единицы сопротивления, является образцовая катушка сопротивления. Набор катушек сопротивления, соединяемых по определенной схеме, называется магазином сопротивлений.

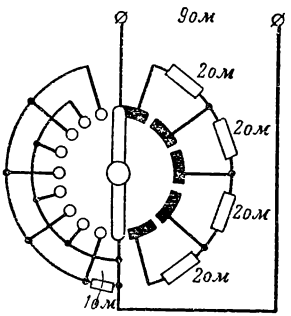


Рис. 7-28. Рычажный пятикатушечный магазин сопротивлений.

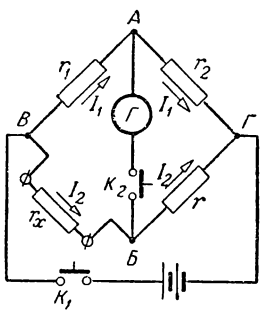


Рис. 7-29. Мост для измерений сопротивлений.

Магазины сопротивлений бывают штепсельные и рычажные, у первых переключение катушек производится при помощи штепселей, у вторых — при помощи рычажных переключателей. На рис. 7-28 дана схема одной «декады» пятикатушечного рычажного магазина сопротивления, дающего возможность переключателем изменять

включенное между зажимами сопротивление от 0 до 9 *ом* ступенями по 1 *ом*.

Мост для измерения сопротивлений, схема которого показана на рис. 7-29, состоит из трех плеч — трех магазинов сопротивлений: r_1, r_2 и r. Четвертым плечом служит измеряемое сопротивление r_x. В одну диагональ моста включают источник питания, в другую — гальванометр.

Изменяя сопротивления трех плеч, при замкнутой кнопке k_1 можно получить равенство потенциалов: точек A и $Б$, о чем можно судить по отсутствию отклонения стрелки гальванометра при замыкании кнопки k_2. В этом случае напряжение $U_{BA} = U_{BБ}$ и $U_{AГ} = U_{БГ}$ или $I_1 r_1 = I_2 r_x$ и $I_1 r_2 = I_2 r$. Разделив почленно, получим:

$$\frac{I_1 r_1}{I_1 r_2} = \frac{I_2 r_x}{I_2 r},$$

откуда

$$r_x = r \frac{r_1}{r_2}. \qquad (7\text{-}20)$$

По найденной формуле для у р а в н о в е ш е н н о г о м о с т а и подсчитывают искомое сопротивление.

Если в схеме моста сопротивление трех плеч и напряжение питания неизменны, то ток в гальванометре зависит только от сопротивления r_x. Это позволяет на шкале гальванометра нанести деления, дающие значения искомого сопротивления или величины, от которой оно зависит, например температуры. Такие измерительные мосты называются н е у р а в н о в е ш е н н ы м и.

б) *Измерение сопротивлений амперметром и вольтметром*

Величина сопротивления

$$r'_x = \frac{U}{I},$$

найденная по показанию амперметра и вольтметра (рис. 7-30), больше действительной величины искомого сопротивления r_x на величину сопротивления амперметра, так как в схеме на рис. 7-30 вольтметр измеряет сумму на-

пряжений на сопротивлении r_x и на амперметре. Если измеряемое сопротивление значительно больше сопротивления амперметра, то погрешность измерения будет небольшой.

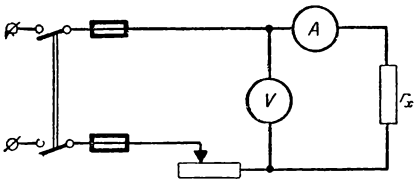


Рис. 7-30. Схема соединения для измерений сопротивлений амперметром и вольтметром (для бо́льших сопротивлений).

Величина сопротивления

$$r'_x = \frac{U}{I},$$

найденная по показанию приборов (рис. 7-31), меньше действительной величины искомого сопротивления r_x, так как амперметр измеряет сумму токов в сопротивлении r_x и в вольтметре. Если измеряемое сопротивление значительно меньше сопротивления вольтметра, то погрешность будет небольшой.

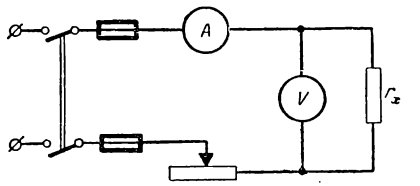


Рис. 7-31. Схема соединения для измерений сопротивлений амперметром и вольтметром (для меньших сопротивлений).

в) Омметры

Омметры и мегомметры это приборы для непосредственного измерения сопротивлений.

Они делятся на две группы: омметры, показания которых зависят от напряжения источника питания, и омметры, показания которых не зависят от напряжения источника питания.

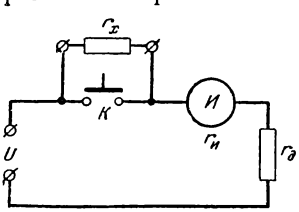


Рис. 7-32. Последовательная схема омметра, показания которого зависят от напряжения источника питания.

Омметр первой группы (рис. 7-32) состоит из магнитоэлектрического измерительного механизма с добавочным сопротивлением $r_д$ и последовательно соединяемым измеряемым сопротивлением r_x — последовательная схема. Омметр часто снабжается батареей сухих элементов.

При разомкнутой кнопке k ток в цепи

$$I = C\alpha = \frac{U}{r_x + r_и + r_д}, \qquad (7\text{-}21)$$

где α и C — угол поворота подвижной части и постоянная по току измерительного механизма.

Из выражения (7-21) следует, что

$$\alpha = \frac{U}{C}\,\frac{1}{r_x + r_и + r_д}.$$

Таким образом, для получения однозначной зависимости угла поворота подвижной части от измеряемого сопротивления, а следовательно, возможности нанести на шкале значения этого сопротивления необходимо при постоянной величине $r_и + r_д$ обеспечить постоянство отношения U/C.

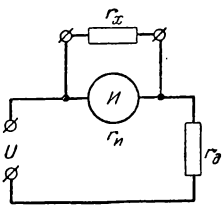


Рис. 7-33. Параллельная схема омметра, показания которого зависят от напряжения источника питания.

Для поддержания неизменным отношения U/C, при изменении напряжения источника питания необходимо регулировать величину C, что достигается изменением магнитной индукции в воздушном зазоре измерительного механизма магнитным шунтом. Магнитный шунт это стальная пластина, которую поворотом винта приближают или удаляют от полюсных башмаков N', S' измерительного механизма (рис. 7-1).

Для регулировки величины C, при подключенных батарее и сопротивлении r_x, замкнув кнопку k, изменяют положение магнитного шунта до тех пор, пока стрелка омметра не установится на нуль шкалы. Разомкнув кнопку, отсчитывают на шкале значение измеряемой величины.

На рис. 7-33 дана другая — параллельная схема того же омметра, в которой измеряемое сопротивление r_x соединяется параллельно измерительному механизму. Можно доказать, что при постоянной величине $r_и + r_д$ и неизменном отношении U/C угол поворота подвижной части будет однозначно зависеть от измеряемого сопротивления.

Омметры второй группы имеют магнитоэлектрический измерительный механизм с двумя рамками на одной оси (рис. 7-34). Ток к рамкам подводится при помощи безмоментных ленточек, не создающих противодействующих моментов.

Токи в рамках направлены противоположно, так что от взаимодействия их с полем магнита создаются два момента, направленные в разные стороны. Разность этих моментов вызывает поворот подвижной части на угол, при котором моменты взаимно уравновешивают друг друга. Угол поворота подвижной части определяется отношением токов в рамках, т. е.

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right).$$

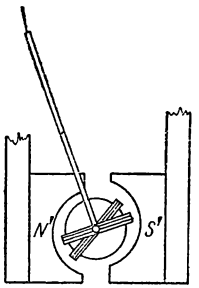


Рис. 7-34. Измерительный механизм логометра.

Измерительные механизмы, угол поворота которых зависит от отношения токов, называются *логометрами*.

Одна параллельная ветвь омметра логометра (рис. 7-35) состоит из рамки и измеряемого сопротивления r_x, другая ветвь — из второй рамки и добавочного сопротивления $r_д$. Приняв во внимание, что токи в параллельных ветвях распределяются обратно пропорционально их сопротивлениям, можно написать:

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{r_x}{r_д}\right).$$

Так как $r_д$ — неизменно, то угол поворота зависит только от величины измеряемого сопротивления.

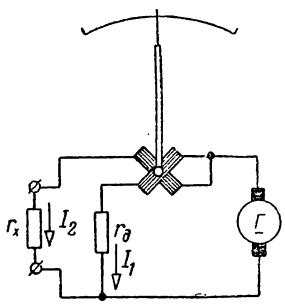


Рис. 7-35. Схема омметра логометра.

Источником питания обычно служит магнитоэлектрическая машина, расположенная в кожухе омметра, приводимая во вращение от руки.

г) Измерение сопротивления изоляции

Изоляция установки относительно легко подвергается изменению, поэтому сопротивление изоляции установки необходимо периодически измерять.

Электротехнические правила для установок низкого напряжения требуют, чтобы сопротивление изоляции участка

сети, расположенного между двумя следующими друг за другом предохранителями или за последним предохранителем, не опускалось ниже 1 000 *ом* на каждый вольт рабочего напряжения, например для сети с напряжением 127 *в* сопротивление должно быть не меньше 1 000 × 127 = 127 000 *ом*.

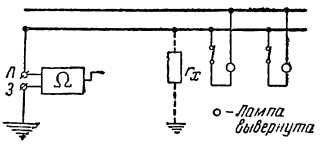


Рис. 7-36. Схема для измерения сопротивления изоляции провода относительно земли.

Сопротивление изоляции сети, не находящейся под рабочим напряжением, определяется при помощи мегомметра. Для измерения изоляции один из зажимов, помеченный буквой *Л*, присоединяют к испытуемому проводу, а второй зажим мегомметра, помеченный буквой *З*, соединяют с землей (рис. 7-36). Вращая рукоятку мегомметра с номинальной скоростью, отсчитывают на шкале искомое сопротивление.

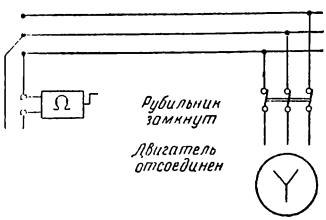


Рис. 7-37. Схема для измерения сопротивления изоляции между проводами.

Присоединив зажим мегомметра *Л* к второму проводу, аналогично определяют сопротивление изоляции второго провода относительно земли. Для измерения сопротивления изоляции между двумя проводами к ним присоединяют два зажима мегомметра (рис. 7-37). Аналогичным образом производится измерение сопротивления изоляции электрических машин и аппаратов.

7-8. ИЗМЕРЕНИЕ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Измерение неэлектрических величин электрическими методами — обширная, быстро развивающаяся область измерительной техники.

Быстрое развитие объясняется возможностью непрерывного измерения, измерения на расстояние, высокой точностью и чувствительностью.

Соблюдение любого технологического процесса возможно обеспечить только применением измерительной техники и автоматики.

В большинстве случаев измерение неэлектрических величин сводится к тому, что неэлектрическая величина преобразуется в зависимую от нее электрическую величину, измеряя которую, определяем и неэлектрическую величину.

Элемент измерительного устройства, преобразующий неэлектрическую величину в электрическую, называется измерительным преобразователем.

Если неэлектрическая величина преобразуется в один из электрических параметров r, L или C, то преобразователь — параметрический, если неэлектрическая величина преобразуется в э. д. с., то преобразователь генераторный.

Параметрические преобразователи по принципу действия делятся на следующие группы:

1. Реостатные преобразователи. Зависимость сопротивления реостата от измеряемой неэлектрической величины, которая воздействует на его движок, используется для измерения объема и уровня жидкостей, для измерения перемещения деталей и т. д.

2. Преобразователи контактного сопротивления. В основе их работы лежит зависимость контактного сопротивления от измеряемой величины, например давления, деформации и т. д.

3. Проволочные преобразователи. Работа их основана на изменении сопротивления проволоки при ее деформации.

4. Преобразователи-термосопротивления. Зависимость температуры и сопротивления провода при тепловом равновесии как от тока, так и от ряда физических величин, определяющих окружающую среду, используется для измерения температур, скорости движения газов, для определения состава газов и др.

5. Электролитические преобразователи. Зависимость электрического сопротивления раствора электролита от его концентрации используется для измерения концентрации растворов электролитов и для количественного анализа жидкостей и газов, растворимых в жидкости.

6. Индуктивные преобразователи. Зависимость индуктивности преобразователя от изменения положения одной из его частей под действием измеряемой величины используется для измерения силы, давления, линейного перемещения.

7. Магнитоупругие преобразователи. Зависимость магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника преобразователя, а следовательно, и индуктивного сопротивления преобразователя от механических напряжений, действующих на сердечник, используется для измерения механических величин.

8. Емкостные преобразователи. Изменение емкости преобразователя под действием силы, давления, линейного перемещения, угла поворота, количества вещества, содержания влаги используется для измерения этих величин.

9. Фотоэлектрические преобразователи. Получение фототока, определяемого световым потоком, который зависит от измеряемой неэлектрической величины, или получение импульсом фототока, частота которых зависит от измеряемой величины, используется для измерения линейных размеров, температуры, прозрачности и мутности жидкости и газовой среды.

10. Ионизационные преобразователи. Зависимость ионизационного тока от ряда факторов используется для анализа газа и определения его плотности, определения геометрических размеров изделий и т. д.

Генераторные преобразователи по принципу действия делятся на следующие группы:

1. Индукционные преобразователи. Преобразование измеряемой неэлектрической величины в индуктированную э. д. с. используется для измерения скорости, линейных или угловых перемещений.

2. Термоэлектрические преобразователи. Возникновение термо-э. д. с. в цепи преобразователя и зависимость ее от температуры используется для ее измерения.

3. Пьезоэлектрические преобразователи. Пьезоэлектрический эффект, т. е. возникновение э. д. с. в некоторых кристаллах под действием механических сил, используется для измерения этих сил, давлений и геометрических размеров изделий.

Устройство для измерения неэлектрических величин электрическим путем в простейшем случае состоит из преобразователя, соединительных проводов и измерительного механизма, на шкале которого обычно наносятся значения измеряемой неэлектрической величины. В большинстве же случаев измерительные устройства усложняются примене-

нием: а) сложных схем; б) источников питания; в) стабилизаторов; г) выпрямителей; д) усилителей и т. д.

Рассмотрим принцип работы и упрощенные схемы некоторых наиболее распространенных измерительных преобразователей.

а) Реостатные преобразователи

Реостатный преобразователь это реостат (рис. 7-38), движок которого перемещается под действием измеряемой неэлектрической величины x, так что величина сопротивления реостата r зависит от величины x:

$$r = f(x).$$

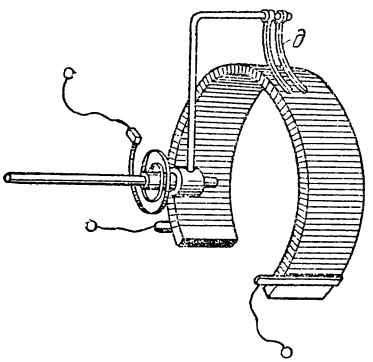


Рис. 7-38. Реостатный преобразователь.

Измерив r, можно найти x.

В схемах на рис. 7-39, *а* и *б* с реостатным преобразователем использованы однорамочные магнитоэлектрические измерительные механизмы, а в схеме на рис. 7-39,*в* применен двухрамочный механизм логометра.

Пример применения реостатного преобразователя для измерения уровня или объема жидкости показан на рис. 7-40.

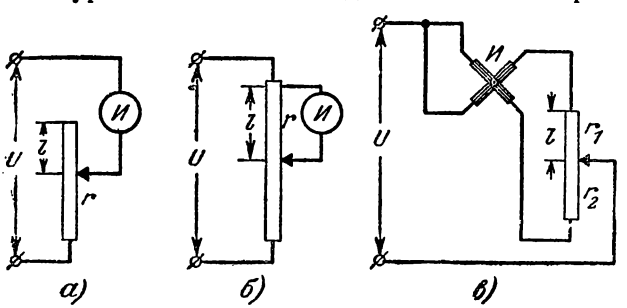


Рис. 7-39. Схемы с реостатным преобразователем.

Изменение положения поплавка, определяемого уровнем или объемом жидкости, вызывает изменение сопротивлений

r_1 и r_2, включенных последовательно с катушками логометра. В результате изменяются отношение токов в катушках и показание прибора. Шкала прибора градуируется в значениях измеряемой величины объема или уровня жидкости.

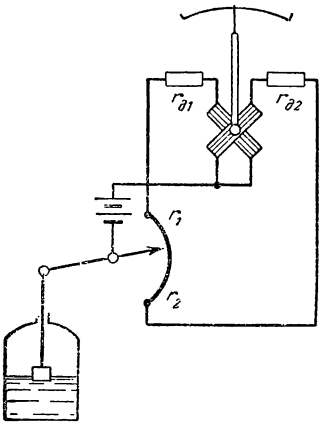


Рис. 7-40. Схема уровнемера.

б) Преобразователи контактного сопротивления

Столбик из 10—15 угольных шайб ($d = 0{,}5 \div 1$ *см*), на концах которого расположены латунные диски с выводами для включения в измерительную цепь, зажат между двумя винтами *а* и *б* (рис. 7-41), изолированными от столбика слюдяными прокладками.

Электрическое сопротивление столбика зависит от его сжатия, так как при этом изменяется переходное сопротивление между шайбами. Таким образом, по изменению электрического сопротивления столбика можно определить механическую силу P, действующую на винт *б*.

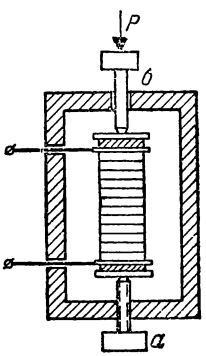


Рис. 7-41. Преобразователь с угольными шайбами.

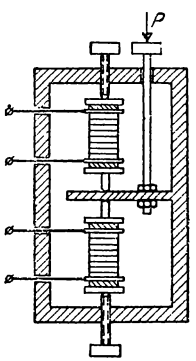


Рис. 7-42. Дифференциальный преобразователь с угольными шайбами.

Применение двух столбиков (рис. 7-42) — при действии на которые измеряемой силы P увеличивается сжатие одного и уменьшается сжатие другого столбика — дает увеличение точности измерения.

Включением двух столбиков в два смежных плеча измерительного моста устраняется влияние температуры на результат измерения, так как изменение температуры вызовет одинаковое изменение сопротивлений обоих столбиков и равновесие моста сохранится.

в) Проволочные преобразователи

Эти преобразователи изготовляются из тонкой проволоки ($d = 0{,}02 \div 0{,}04$ *мм*), концы которой привариваются к медным выводам (рис. 7-43). Проволока закрепляется специальным клеем между двумя листочками тонкой бумаги площадью 0,1—10 *см*^{2}.

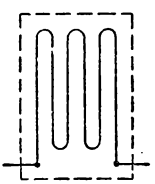


Рис. 7-43. Схема проволочного преобразователя.

Преобразователь приклеивается на поверхность испытуемой детали или конструкции и воспринимает ее деформацию, при этом изменяются размеры, удельное сопротивление материала и сопротивление преобразователя. По относительному изменению сопротивления можно определить механические напряжения, возникающие в детали или конструкции.

Для преобразователей применяется проволока из константана, нихрома или железо-хромалюминиевого сплава — материалов, обладающих большой относительной чувствительностью $k = \frac{\Delta r/r}{\Delta l/l}$, малым температурным коэффициентом и большим удельным сопротивлением.

Сопротивление преобразователя — несколько сотен ом, а относительное изменение сопротивления — десятые доли процента.

Для устранения влияния температуры применяют два одинаковых преобразователя: один — «рабочий», другой — «нерабочий», которые включаются в два смежных плеча измерительного моста. Рабочий преобразователь наклеивается на поверхность испытуемой детали, а нерабочий — на поверхность из такого же металла, что и испытуемая деталь.

Проволочные преобразователи являются разовыми, т. е. наклеиваются только 1 раз.

Партия преобразователей, изготовленная из одной и той же проволоки, при одинаковом сопротивлении и одинаковой технологии обладает характеристиками $r = f(\Delta l/l)$, совпадающими с точностью до 1%. Это дает возможность, получив указанную характеристику для одного из преобразователей данной партии, применять ее и для остальных преобразователей этой партии.

г) Термосопротивления

Прохождение электрического тока по проводу сопровождается выделением тепла, которое частично идет на нагревание провода, частично отдается в окружающую среду конвекцией, теплопроводностью и излучением.

При установившемся тепловом равновесии температура провода и его сопротивление зависят от тока в проводе и от причин, влияющих на отдачу тепла в окружающую среду. К ним относятся: размеры провода, его конфигурация и арматура, температуры провода и среды, скорость движения среды, ее состав, плотность и др.

Указанные зависимости используются для измерения температуры, скорости, плотности и состава газовой среды по сопротивлению провода. Провод, предназначенный для указанной цели, является измерительным преобразователем и носит название термосопротивления.

При применении термосопротивления необходимо создать условия, в которых измеряемая неэлектрическая величина оказывает наибольшее влияние на величину термосопротивления, а остальные величины, наоборот, по возможности не влияют на его величину. Следует стремиться к уменьшению теплоотдачи, возникающей благодаря теплопроводности выводных зажимов провода, и лучеиспусканию. При длине провода, в 500 или большее число раз превосходящей его диаметр, отдачей через теплопроводность выводных зажимов провода можно пренебречь. Отдачей тепла излучением можно пренебречь, если разность температур провода и среды не превышает 100° С.

Рассмотрим газоанализаторы, в которых термосопротивление применяется для определения содержания газа в газовой смеси.

Смесь из двух газов, не вступающих друг с другом в химическую реакцию, имеет теплопроводность, равную сред-

ней арифметической из теплопроводностей составляющих, т. е.

$$\lambda_{12} = \frac{\lambda_1 a + \lambda_2 b}{100},$$

где λ_{12}, λ_1, λ_2 — теплопроводности смеси и ее составляющих;

a и b — процентное содержание составляющих газовой смеси.

Приняв во внимание, что $b = 100 - a$, можем написать:

$$\lambda_{12} = \frac{\lambda_1 a + \lambda_2 (100 - a)}{100},$$

откуда

$$a = 100 \frac{\lambda_{12} - \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}.$$

Измерив теплопроводность смеси λ_{12} и зная теплопроводности λ_1 и λ_2, можно определить процентное содержание одной из составляющих газовой смеси. При этом необходимо, чтобы температура термосопротивления, а следовательно, и его сопротивление при прохождении по нему тока $I = \text{const}$, зависели только от теплопроводности смеси λ_{12}, т. е. чтобы

$$r = f(\lambda_{12}) \text{ или } r = f_1(a).$$

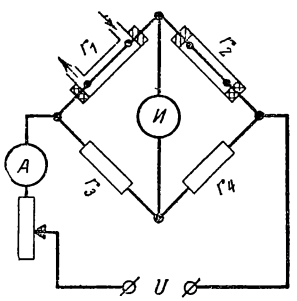


Рис. 7-44. Схема газоанализатора CO_2

Газоанализатор углекислого газа (рис. 7-44) имеет два одинаковых термосопротивления r_1 и r_2, включенных в два смежных плеча моста. Первое — рабочее — находится в камере, в которой проходит газовая смесь, второе — нерабочее, расположенное в камере с воздухом. На шкале измерителя нанесены деления, дающие значения содержания CO_2.

В термометрах сопротивления термосопротивления применяются для измерения температур. Они изготовляются обычно из проволоки, материал которой должен обладать большим температурным коэффициентом сопротивления: платина до 500° С, никель до 300° С, медь

до 150° С. Проволоку наматывают на каркас из пластмассы или слюды и помещают в защитную оболочку, размеры и форма которой определяются назначением термометра.

Сопротивление термометра обычно 50 или 100 *ом*.

По величине сопротивления преобразователя определяют его температуру, а следовательно, и температуру окружающей его среды.

Для измерений часто применяют схему неуравновешенного моста с магнитоэлектрическим логометром (рис. 7-45). Три плеча моста r_1, r_2, r_3 выполнены из манганина, четвертое $r_т$ — термосопротивление. Две рамки логометра ($r_{л1}$ и $r_{л2}$) включены в диагональ моста, общая точка их через сопротивление $r_б$ соединена с вершиной моста *2*.

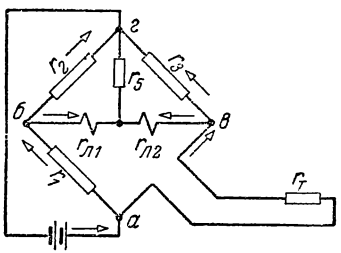


Рис. 7-45. Схема моста с логометром термометра сопротивления.

При равновесии моста ($r_2 = r_3$, $r_1 = r_т$; $r_{л1} = r_{л2}$), когда потенциалы точек *б* и *в* одинаковые, в рамках логометра идут одинаковые токи встречного направления. При нарушении равновесия токи в рамках логометра изменяются. Их приращения $\Delta I_{л1}$ и $\Delta I_{л2}$ не равны и имеют противоположные знаки, что влечет за собой поворот стрелки логометра. Угол поворота

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{I_{л1} + \Delta I_{л1}}{I_{л2} + \Delta I_{л2}}\right) = f_1(r_т) = f_2(\theta).$$

Применение полупроводниковых термосопротивлений рассмотрено в гл. 13.

д) Электролитические преобразователи

Удельная электропроводность электролита зависит от его концентрации, поэтому концентрацию можно определить по величине его сопротивления.

Измерительный электролитический преобразователь представляет собой сосуд с испытуемым электролитом и двумя электродами (рис. 7-46).

Во избежание электролиза измерение сопротивления электролита производится на переменном токе. Для устра-

нения влияния температуры применяется температурная компенсация. Один из термокомпенсаторов показан на рис. 7-46. Он представляет собой медно-никелевое сопротивление $r_к$, расположенное в растворе и соединенное с разветвлением из искомого сопротивления r_x и шунтирующего манганинового сопротивления r_1. Сопротивления r_1 и $r_к$ подобраны так, что изменение сопротивления электролита, вызванное изменением его температуры, с точностью до 1—2%, компенсируется изменением сопротивления $r_к$.

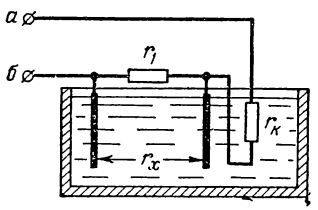


Рис. 7-46. Схема электролитического преобразователя.

Измеряемое сопротивление r_x находится по сопротивлению $r_{а,\,б}$ между точками *а*, *б* схемы, которое определяется обычно при помощи неуравновешенного измерительного моста (§ 7-7, *а*), в одно из плеч которого включаются зажимы *а*, *б* электролитического преобразователя. Мост питается через стабилизатор от сети переменного тока. На выходе моста включается выпрямительный миллиамперметр, шкала которого проградуирована в значениях концентрации раствора электролита.

е) Индуктивные преобразователи

Индуктивный преобразователь (рис. 7-47а) это электромагнит, якорь которого перемещается под действием измеряемой механической величины *P*: силы, давления, линей-

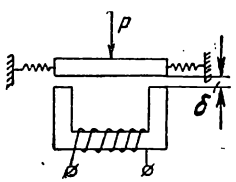


Рис. 7-47а. Схема индуктивного преобразователя.

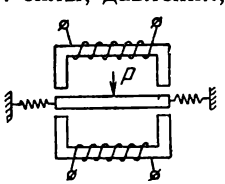


Рис. 7-47б. Схема индуктивного дифференциального преобразователя.

ного перемещения. Изменение положения якоря изменяет воздушный зазор δ, а следовательно, индуктивность катушки электромагнита и ее полное сопротивление, т. е.

$$Z = f(P).$$

В дифференциальном преобразователе (рис. 7-47б) перемещение якоря вызывает увеличение индуктивности одной катушки и уменьшение индуктивности другой, что повышает чувствительность преобразователя. Включение двух катушек в смежные плечи измерительного моста дает температурную компенсацию.

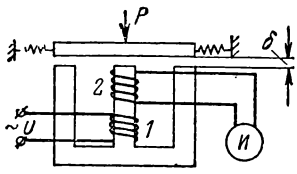


Рис. 7-48. Схема индуктивного преобразователя-трансформатора.

В индуктивном преобразователе трансформаторного типа (рис. 7-48) первичная обмотка питается переменным током с постоянным действующим значением. Под действием измеряемой механической величины P изменяется воздушный зазор δ, магнитное сопротивление цепи, а следовательно, и магнитный поток, пронизывающий вторичную обмотку, к зажимам которой присоединен вольтметр. Таким образом, вторичная индуктированная э. д. с. и показания вольтметра зависят от измеряемой величины, т. е.

$$E_2 \approx U_2 = f(P).$$

ж) Емкостные преобразователи

Емкостный преобразователь представляет собой конденсатор, емкость которого изменяется под действием измеряемой неэлектрической величины.

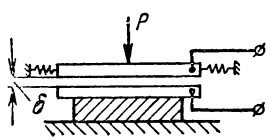


Рис. 7-49. Принцип работы емкостного манометра и динамометра.

Так как емкость конденсатора зависит от площади электродов, их формы, расстояния между ними, а также от размеров диэлектрика и его диэлектрической проницаемости, то эти преобразователи можно применять для измерения тех неэлектрических величин, значения которых влияют на один из перечисленных выше параметров емкостного преобразователя.

В емкостных манометрах и динамометрах изменяется воздушный зазор δ (рис. 7-49) между двумя пластинами конденсатора под действием измеряемого давления P или силы F.

Работа емкостного преобразователя для измерения толщины резиновой ленты *1*, которая протягивается между двумя неподвижными электродами *3* (рис. 7-50), основана на влиянии толщины ленты на изменение воздушного зазора и емкость преобразователя.

Емкостный преобразователь для измерения влажности зерна, порошка, волокна, пряжи представляет собой цилин-

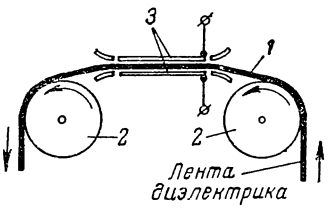


Рис. 7-50. Схема устройства емкостного преобразователя для измерения толщины ленты.

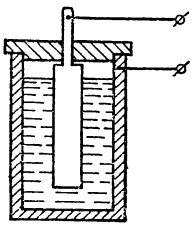


Рис. 7-51. Принцип устройства емкостного преобразователя влагомера.

дрический конденсатор (рис. 7-51). Внутренний электрод имеет форму цилиндрического стержня, наружный электрод — форму стакана, внутреннее пространство до определенного уровня заполняется испытуемым материалом. Содержание влаги в испытуемом материале резко увеличивает емкость вследствие большой диэлектрической проницаемости воды ($\varepsilon = 80$).

Емкостные преобразователи имеют малую емкость, поэтому измерения их емкости производятся при повышенной или высокой частоте, применяя при этом электронные усилители.

з) Ионизационные преобразователи

Структурная схема одного из ионизационных преобразователей с радиоактивным изотопом для непрерывного измерения толщины движущейся ленты или стального проката показана на рис. 7-52.

Радиоактивное излучение изотопа *1* частично поглощается изделием *2*. Количество энергии, полученной индикатором *3*, зависит от толщины изделия и его материала. Индикатор *3* через усилитель *4* соединен с измерительным механизмом *5*, дающим значение измеряемой величины.

В измерителе давления газа под воздействием излучения изотопа *1* (рис. 7-53) в сосуде *2* происходит ионизация газа. Интенсивность ионизации и ионизационный ток, проходящий по цепи под действием напряжения U, зависят от давле-

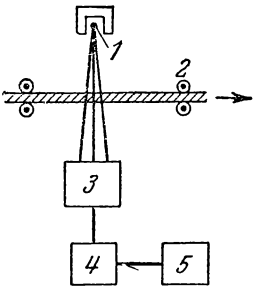


Рис. 7-52. Схема ионизационного преобразователя для измерения толщины ленты.

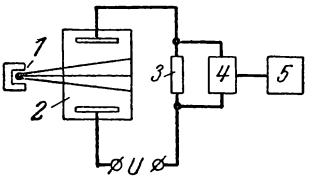


Рис. 7-53. Схема прибора для измерения давления газа.

ния газа. Измерительный механизм *5* включен через усилитель *4* на сопротивление *3*, на котором создается падение напряжения, пропорциональное ионизационному току.

и) Индукционные преобразователи

В индукционном тахометре, приборе для измерения скорости вращения, измеряемая величина преобразуется в пропорциональную ей э. д. с. Тахометр (рис. 7-54) представляет собой маленькую магнитоэлектрическую машинку, якорь которой вращается между полюсами постоянного магнита и, следовательно, напряжение на зажимах которой пропорционально скорости вращения якоря. Якорь механически связан с валом машины, скорость которой измеряется, поэтому показание вольтметра, присоединенного к зажимам якоря, пропорционально измеряемой скорости вращения.

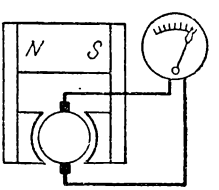


Рис. 7-54. Схема индукционного тахометра.

Индукционный тахометр с вращающимся магнитом (рис. 7-55) состоит из алюминиевого диска *1*, укрепленного на одной оси со стрелкой *2*, и постоянного магнита, механически связанного с валом машины, скорость которой измеряется.

При вращении постоянного магнита в диске индуктируются э. д. с. и вихревые токи. В результате взаимодействия вихревых токов с полем постоянного магнита создается вращающий момент, вызывающий поворот диска на угол, при котором этот момент уравновешивается моментом пружины *3*. Каждой скорости вращения соответствует определенный угол поворота подвижной части.

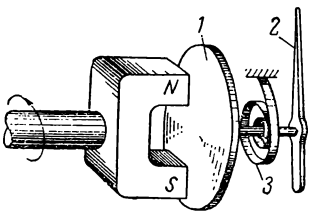


Рис. 7-55. Устройство тахометра с вращающимся магнитным полем.

к) Пьезоэлектрические преобразователи

Пьезоэлектрический эффект, используемый в преобразователях, заключается в появлении электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллических диэлектриков (кварц) под действием механических напряжений или деформаций.

Измеряемое давление P действует на дно корпуса преобразователя (рис. 7-56), являющееся мембраной. Две пластинки кварца зажаты между тремя металлическими прокладками. Между верхней прокладкой и крышкой корпуса расположен шарик, обеспечивающий равномерность распределения измеряемого давления. К средней прокладке — отрицательному электроду — присоединен провод, изолированный от корпуса втулкой.

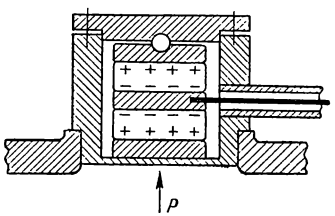


Рис. 7-56. Пьезоэлектрический кварцевый преобразователь для измерения давления.

Разность потенциалов между отрицательным электродом и корпусом пропорциональна давлению P, которое и определяют по разности потенциалов.

Заряды при снятии давления исчезают, поэтому необходима хорошая изоляция отрицательного электрода.

Отрицательный электрод соединяется с сеткой первой лампы усилителя (§ 13-11), на выходе которого включается измерительный механизм.

л) Термоэлектрические преобразователи

Сочетание магнитоэлектрического измерительного механизма с термоэлектрическим преобразователем — термопарой (рис. 7-57), предназначенное для измерения температур, называется термоэлектрическим пирометром.

Нагревание рабочего конца термопары вызывает термо. д. с. и ток в цепи измерительного механизма, по отклонению подвижной части которого и определяется температура. Провода термопары должны быть достаточно длинными, чтобы их свободные концы находились в среде с температурой, при которой градуировался пирометр. При измерении невысоких температур влияние температуры свободных концов термопары может быть очень большим. Для устранения этого влияния свободные концы помещают в термостат с постоянной температурой.

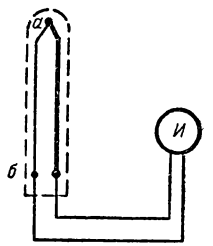


Рис. 7-57. Схема термоэлектрического пирометра.

Для термопар применяют: медь — константан (до 300° С), медь — копель (до 600 °С), железо — копель (до 800° С), хромель — копель (до 800° С), хромель — алюмель (до 1 300° С), платина — платинородий (до 1 600° С).

Указанные сплавы имеют состав: копель 56,5% Cu + + 43,5% Ni; хромель 90% Ni + 10% Cr; алюмель 1% Si + 2% Al + 17% Fe + 2% Mn + 78% Ni.

Для защиты от механических повреждений и действия газов термопары помещают в защитные трубки из латуни, стали, фарфора или других материалов.

7-9. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

Перед выполнением работы ознакомиться с содержанием § 7-7 и 7-8.

План работы

1. Записать основные технические данные измерительных приборов.

2. Пользуясь мегомметром, произвести измерение:

а) сопротивления изоляции каждого из проводов осветительной установки относительно земли (рис. 7-36);

б) сопротивления изоляции между проводами (рис. 7-37).

Перед измерениями необходимо замкнуть все выключатели и рубильники, лампы накаливания вывернуть, а другие приемники энергии отсоединить.

3. Выяснить, удовлетворяет ли требованиям правил эксплуатации изоляция испытуемой установки.

4. Пользуясь мегомметром, измерить:

а) сопротивление изоляции каждой из фаз статора трехфазного асинхронного двигателя относительно корпуса (земли);

б) сопротивление изоляции между каждыми двумя фазами статора того же двигателя.

5. Выяснить, удовлетворяет ли сопротивление изоляции двигателя правилам эксплуатации.

7-10. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ПОВЕРКА ИНДУКЦИОННОГО СЧЕТЧИКА

Перед выполнением работы ознакомиться с содержанием § 7-6.

План работы

1. Записать основные технические данные измерительных приборов.

2. Собрать схему (рис. 7-58) для поверки счетчика и показать ее руководителю.

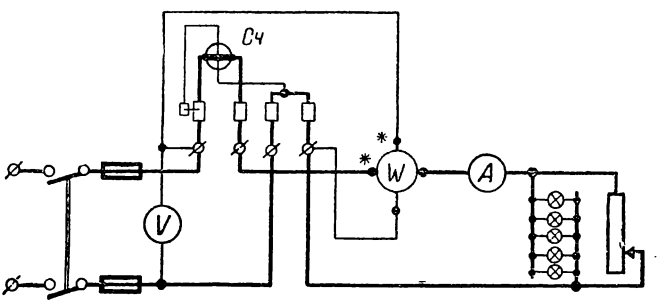


Рис. 7-58. Схема соединения для поверки счетчика.

3. При отсутствии тока в последовательной обмотке счетчика и номинальном напряжении на его параллельной цепи убедиться в отсутствии вращения диска счетчика, т. е. убедиться в отсутствии у счетчика холостого хода.

4. а) При номинальном напряжении в цепи установить нагрузку в 10% от номинальной для счетчика и отсчитать целое число оборотов диска счетчика за 100—150 *сек.* Записать показания ваттметра, амперметра, вольтметра и секундомера в табл. 7-3.

б) Определить по формуле

$$k = \frac{Pt}{N}$$

действительную постоянную счетчика, т. е. действительную энергию, расходуемую в цепи за время одного оборота диска счетчика.

Таблица 7-3

№ наблюдений	P	U	I	cos φ	t	N	k	$k_н$	γ	Примечания
	вт	*в*	*а*	—	*сек*	*об*	*вт· сек/об*	*вт· сек/об*	%	

в) Определить погрешность счетчика при указанной нагрузке, пользуясь формулой

$$\gamma = \frac{k_н - k}{k} 100\%,$$

где $k_н$ — номинальная постоянная счетчика, указанная на его щитке.

5. Повторить наблюдение и подсчеты, указанные в п. 4 для нагрузок 25, 50, 75 и 100% номинальной нагрузки счетчика.

6. Определить, удовлетворяет ли счетчик требованиям стандарта в отношении его погрешности, если известно, что по стандарту для счетчика класса точности 2,5 при указанных нагрузках допускается погрешность не выше ± 2,5%.

7-11. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В ЦЕПИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Перед выполнением работы ознакомиться с содержанием § 7-5.

1. Записать основные технические данные приборов.

2. Собрать схему (рис. 7-59) и показать ее руководителю.

3. Включить схему в сеть, установить равномерную активную нагрузку и записать в табл. 7-4: токи, напряжения и мощность, измеряемую двухэлементным ваттметром P (однополюсные рубильники замкнуты), мощность P', измеряемую первым элементом ваттметра (однополюсный рубильник *2* разомкнут), и мощность P'', измеряемую вторым элементом ваттметра (однополюсный рубильник *1* разомкнут).

Убедиться в том, что

$$P = P' + P'' = \sqrt{3} IU.$$

Определить отношение

$$P/P' \text{ и } P/P''.$$

4. Повторить измерения и расчеты, указанные в п. 3, при другом значении нагрузки.

5. Установить равномерную смешанную (активно-реактивную) нагрузку и записать в табл. 7-4 величины, указанные в п. 3.

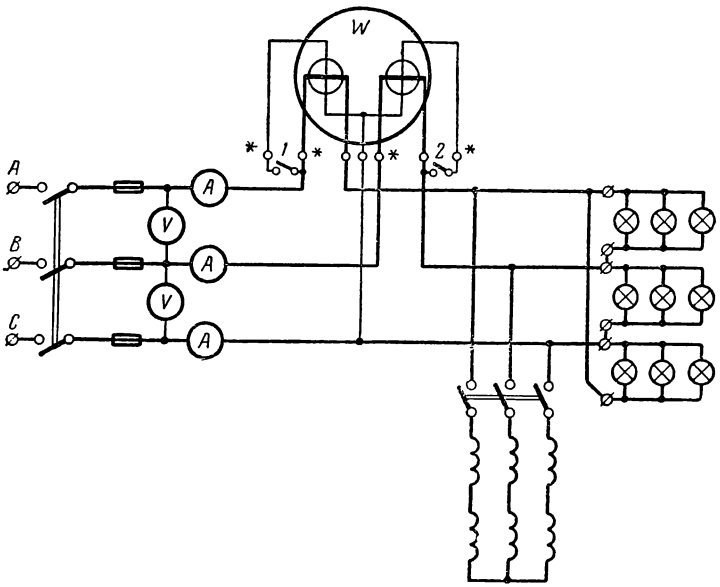


Рис. 7-59. Схема к работе: измерение мощности в цепи трехфазного тока.

Убедиться в том, что

$$P = P' + P''.$$

Определить

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3}IU};$$

$$\angle\varphi;\ P/P' \text{ и } P/P''.$$

6. Изменяя реактивную нагрузку, повторить 3 раза измерения и расчеты, указанные в п. 5.

Сравнивая отношение P/P' при различных нагрузках, а также отношение P/P'' при различных нагрузках, легко убедиться, что отношения не остаются постоянными. Это дает право утверждать, что по показанию одного из элементов ваттметра нельзя судить о мощности цепи трехфазного тока.

7. Произвести два измерения мощности при неравномерной смешанной нагрузке трехфазной цепи. Показания приборов записать в табл. 7-4.

Таблица 7-4

№ наблюдений	I_A	I_B	I_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	P	P'	P''	$P'+P''$	$\sqrt{3}IU$	P/P'	P/P''	$\cos\varphi$	φ	Примечание
	а	*а*	*а*	*в*	*в*	*в*	*вт*	*вт*	*вт*	*вт*	*вт*	—	—	—	*град*	

7-12. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ГРАДУИРОВКА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПИРОМЕТРА И ПРИМЕНЕНИЕ ЕГО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР

Перед выполнением работы ознакомиться с содержанием § 7-8, *л* и 7-7, *б*.

План работы

1. Записать основные технические данные приборов.

2. Собрать схему (рис. 7-60) для градуировки термоэлектрического пирометра и показать ее руководителю.

Примечание. Термопара и термометр, по которому градуируется пирометр, закладываются в выточку стального сердечника катушки, питаемой переменным током. Вихревые токи, возникающие в сердечнике, вызывают его нагревание.

3. Замкнув рубильник, при различных значениях температуры записать показания термометра и измерительного механизма пирометра в табл. 7-5.

4. По полученным данным построить градуировочную кривую $n = f(\theta)$.

5. Для измерения температуры катушки собрать схему (рис. 7-61) и показать ее руководителю.

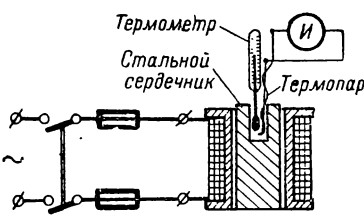


Рис. 7-60. Схема соединения для градуировки термоэлектрического пирометра.

Примечание. Термопара закладывается в щель между витками катушки.

6. Замкнув рубильник, записать в табл. 7-6 показания приборов через каждые 5 *мин* в течение 60 *мин*. Первое показание записать сразу после замыкания рубильника. По полученным данным определить:

Таблица 7-5

$\theta_{терм}$	°С										
$n_{изм.\ мех.}$	делений										

1) температуру катушки в различные моменты времени по показаниям термоэлектрического пирометра; 2) температуру катушки

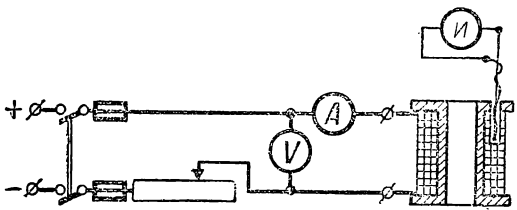


Рис. 7-61. Схема соединения для измерения температуры катушки.

для тех же моментов времени по изменению ее сопротивления [по формуле (1-21)].

Сопротивление r_1 при температуре θ и сопротивление r_n при соответствующей температуре θ_n определяются по показаниям амперметра и вольтметра по формуле $r = U/I$.

Таблица 7-6

№ наблюдений	U	I	$r = \frac{U}{I}$	t	n	Θ катушки		Примечание
						по показаниям пирометра	по сопротивлению катушки	
	в	*а*	*ом*	*мин*	—	°С	°С	

7. По полученным данным построить кривую зависимости температуры катушки от времени

$$\theta = f(t).$$

8. Определить, больше или меньше номинального тока катушки тот ток, который проходил по ней, если допустимая температура катушки составляет 90° С.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

8-1. НАЗНАЧЕНИЕ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Устройства, предназначенные для превращения механической энергии в электрическую или обратно, называются электрическими машинами. Машина, превращающая механическую энергию в электрическую, называется генератором. Когда машина превращает электрическую энергию в механическую, она называется электродвигателем.

Электрические машины постоянного тока применяются в установках для электролиза, а также там, где необходимо создание больших вращающих моментов и широкого регулирования скорости — электрическая тяга, шахтные подъемники, прокатные станы. В автоматике они применяются как измерители скорости вращения, исполнители передаваемых сигналов и как преобразователи сигналов.

8-2. УСТРОЙСТВО МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Работа машины постоянного тока основана на принципах, изложенных в § 3-9, 3-10. На рис. 8-1 представлен эскиз двухполюсной машины постоянного тока. Машина состоит из двух основных частей: неподвижной станины *1* и вращающегося якоря *2*. К станине крепятся полюсы *3*, на которые помещается обмотка возбуждения *4*. Намагничивающая сила обмотки возбуждения при прохождении по последней тока возбуждения $I_в$ создаёт магнитный поток Ф, замыкающийся, как показано на рис. 8-1, через полюсы, якорь и станину.

Станина машины стальная, полюсы набираются из стальных листов (рис. 8-2). Полюсы оканчиваются полюсными наконечниками *5*, обеспечивающими крепление обмотки возбуждения и позволяющими, известным образом, распределять магнитную индукцию B в воздушном зазоре между полюсами и якорем.

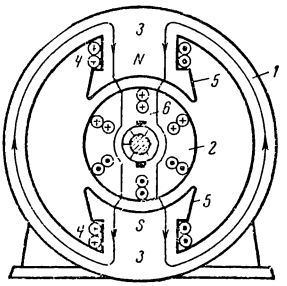


Рис. 8-1. Двухполюсная машина постоянного тока.

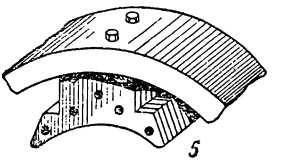


Рис. 8-2. Полюс машины.

Якорь машины показан на рис. 8-3. Это цилиндр *1*, набранный из штампованных стальных дисков, запрессованных на валу *2*, и имеющий на поверхности пазы *3*. В пазы укладываются провода якоря, образующие обмотку якоря *4*. Обмотка в пазах крепится специальными клиньями или бандажами *5* и электрически соединяется с коллектором *6*, закрепленным на валу и электрически изолированным от вала. Коллектор служит для электрического соединения вращающейся обмотки якоря с неподвижной внешней сетью при помощи неподвижных щеток *6* (рис. 8-1). Кроме того, коллектор обеспечивает получение на щетках постоянной по величине

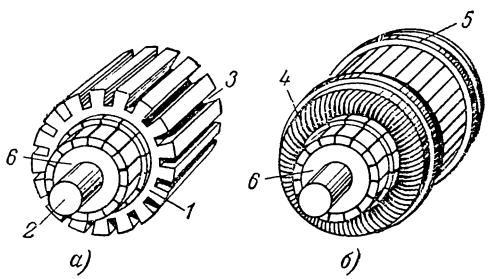


Рис. 8-3. Якорь машины.
а — без обмотки; *б* — с обмоткой.

и направлению э. д. с. E машины, несмотря на то, что в проводах обмотки якоря наводятся переменные э. д. с.

Цилиндрический коллектор (рис. 8-4) состоит из медных клиновидных пластин *1*, собранных на специальной оправке *2* и закрепленных на ней болтами. Пластины изолированы друг от друга и от вала миканитом. В последнее время для

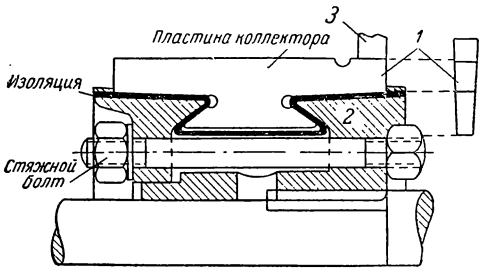


Рис. 8-4. Конструкция коллектора.

малых машин коллекторные пластины вместе с миканитовыми прокладками запрессовываются в пластмассу при соответствующей термической обработке. Определенные точки обмотки якоря припаиваются к выступам коллекторных пластин *3*, называемых «петушками».

Щетки машины (рис. 8-5) представляют собой угольные или графитовые призмы *1*, помещаемые в обоймы — щ е т-

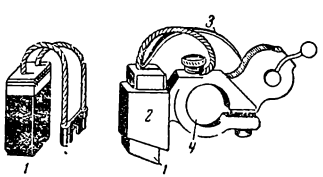


Рис. 8-5. Щетка и щеткодержатель.

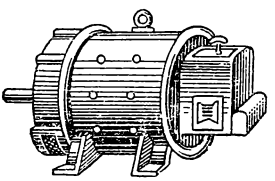


Рис. 8-6. Внешний вид машины постоянного тока малой мощности.

к о д е р ж а т е л и *2*. К коллектору щетки прижимаются пружиной *3*. Щеткодержатели установлены на изолированных болтах, проходящих через отверстие *4*, и крепятся к корпусу машины. Щеточные болты присоединяются проводами к зажимам машины.

З а ж и м ы обозначаются следующим образом: $Я_1Я_2$ — обмотка якоря; $Ш_1Ш_2$ — обмотка возбуждения параллель-

ная (шунтовая); C_1C_2 — обмотка возбуждения последовательная (сериесная); $Д_1$-$Д_2$ — обмотка дополнительных полюсов. На рис. 8-6 показан внешний вид машины постоянного тока.

8-3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

На рис. 8-7 показана схема включения машины постоянного тока. Пусть ток возбуждения $I_в$, подаваемый в обмотку возбуждения *1* от независимого источника энергии, направлен так, как показано на рис. 8-7, а переключатель *2* замкнут на нижние зажимы. Если якорь машины вращать при помощи первичного двигателя (паровая машина, двигатель внутреннего сгорания и др.), то в обмотке якоря появится э. д. с. E, под действием которой во внешней цепи r и обмотке якоря $r_я$ пойдет постоянный ток I, совпадающий по направлению с э. д. с.

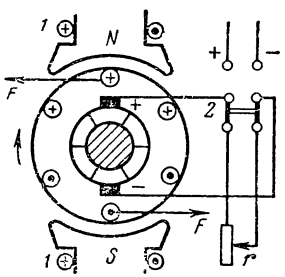


Рис. 8-7. Принцип работы машины постоянного тока.

Из формулы Ома

$$I = I_я = \frac{E}{r + r_я} \qquad (8\text{-}1)$$

следует, что

$$E = Ir + Ir_я = U + Ir_я, \qquad (8\text{-}2)$$

т. е. э. д. с. машины равна сумме напряжения на ее зажимах и падения напряжения в обмотке якоря.

На провода с током, находящиеся в магнитном поле, действуют электромагнитные силы F, направление которых определяется правилом левой руки (стрелки на рис. 8-7). Направление э. д. с. и тока якоря $I_я$ определено правилом правой руки. Силы F противодействуют вращению якоря, т. е. создают на валу машины тормозной момент $M_т$. Для преодоления момента $M_т$ первичный двигатель должен создавать встречный ему вращающий момент $M_в$. Следовательно, как это объяснялось в § 3-10, машина превращает механическую энергию в электрическую и работает в режиме генератора. В этом режиме э. д. с. E больше напряжения U на величину падения напряжения в обмотке якоря $Ir_я$.

Теперь предположим, что переключатель *2* на рис. 8-7 включен на верхние контакты, а якорь машины механически отсоединен от первичного двигателя. Тогда от внешнего источника энергии в обмотку якоря пойдет ток $I = I_я$, направление которого будет обратно тому, какое было в генераторе. Электромагнитные силы, созданные этим током и магнитным полем, будут иметь обратное направление и создадут вращающий момент $M_в$. Якорь будет вращаться в прежнем направлении. Согласно § 3-10 будет происходить процесс превращения электрической энергии в механическую — машина будет работать электродвигателем.

Пользуясь правилом правой руки, легко убедиться, что наведенная в проводах якоря э. д. с. направлена навстречу току $I_я$ и, как известно, называется встречной э. д. с. или противо-э. д. с. Тогда согласно второму правилу Кирхгофа

$$U - E = I_я r_я \quad \text{или} \quad E = U - I_я r_я, \tag{8-3}$$

а ток

$$I_я = \frac{U - E}{r_я}. \tag{8-4}$$

При работе машины электродвигателем э. д. с. E меньше напряжения на зажимах U на величину падения напряжения в обмотке якоря $Ir_я$.

Для изменения направления вращения электродвигателя достаточно изменить направление тока в обмотке якоря или в обмотке возбуждения, в чем легко убедиться, рассматривая рис. 8-7. При одновременном изменении направления тока в обеих обмотках направление вращения не изменяется.

Таким образом, одна и та же машина может работать и генератором и электродвигателем. Это положение впервые было доказано Э. Х. Ленцем.

8-4. УСТРОЙСТВО ОБМОТКИ ЯКОРЯ

Обмотка машины постоянного тока состоит из одинаковых частей, называемых секциями. На рис. 8-8 представлена одна секция, состоящая из одного витка ($w = 1$), вторая — из двух витков ($w = 2$). Число витков в секции может быть и бо́льшим. Начало и конец каждой секции

припаивается к петушкам двух коллекторных пластин, находящихся рядом или на некотором расстоянии друг от друга. Так как начало каждой секции и конец предыдущей секции припаиваются к одной коллекторной пластине, то образуется замкнутая обмотка.

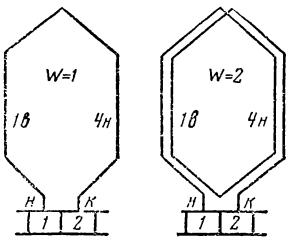


Рис. 8-8. Секция обмотки якоря.

Боковые части секции (рис. 8-8) лежат в пазах. При вращении в них наводится э. д. с., почему они и называются активными сторонами секции. Остальные части секций лежат на торцах якоря, вне пазов. Они называются лобовыми частями и в них э. д. с. не наводится. Активные стороны лежат в пазах в два слоя: нечетные сверху, а четные снизу, у дна паза. Упрощенная схема обмотки якоря, составленная из секций, показана на рис. 8-9. Число витков в секции принято равным единице.

Активные стороны, лежащие в пазах, идущие от зрителя за плоскость рисунка, изображены кружками, а лобовые части сплошными линиями на лицевой стороне торца якоря и пунктиром на торце за плоскостью рисунка. Таким образом, из коллекторной пластины № *1* провод идет в верхний слой паза *1*, затем по невидимому торцу (пунктир) в нижний слой паза *4* и из него в коллекторную пластину № *2*. Из коллекторной пластины № *2* провод идет в верхний слой паза *2* и т. д. После полного обхода якоря обмотка замыкается на себя у коллекторной пластины № *1*.

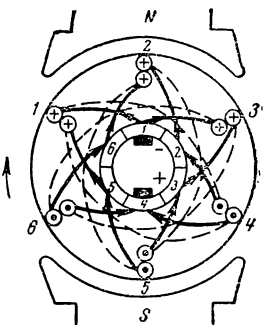


Рис. 8-9. Схема обмотки якоря.

Если обмотка якоря вращается по направлению, указанному на рис. 8-9, то в активных частях ее проводов появится э. д. с., направление которой определено правилом правой руки. В каждой секции наводится э. д. с. $e = E_м \sin \omega t$ и, естественно, что сумма их всех в замкнутой на себя обмотке равна нулю. Однако при обходе всей

обмотки можно заметить, что в одной части проводов э. д. с. имеет одно направление, в другой части — противоположное. Это указывает на наличие двух параллельных ветвей обмотки.

На рис. 8-10 показано, как образуются параллельные ветви между коллекторными пластинами *1* и *4*. Цифры на рисунке обозначают номер паза, а буквы рядом слой — верхний (*в*) или нижний (*н*). Оказывается, что коллекторная пластина *4* является точкой высшего, а коллекторная пластина *1* — низшего потенциала. На эти места и ставятся щетки. На рис. 8-9 щетки показаны условно расположенными внутри коллектора, в действительности же они всегда расположены на его наружной поверхности.

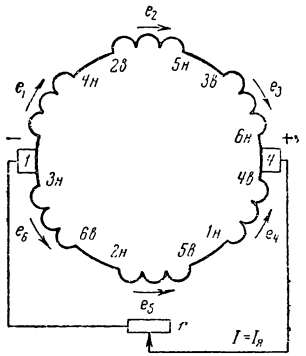


Рис. 8-10. Упрощенное изображение схемы рис. 8-9.

В момент времени, соответствующий положению якоря, показанного на рис. 8-9, между щетками будет действовать разность потенциалов, равная напряжению машины

$$U = e_1 + e_2 + e_3 = e_6 + e_5 + e_4.$$

Можно заметить, что при повороте якоря на угол 60° величина напряжения U и полярность щеток сохранятся прежними, так как шестой паз займет место первого, первый — второго и т. д. На схеме на рис. 8-10 секция (*3в—6н*) из верхней параллельной ветви переключится в нижнюю, а равноценная ей секция (*3н — 6в*) переключится из нижней ветви в верхнюю. Такое же положение будет и при повороте на любой угол, кратный 60°.

Однако при повороте якоря на угол, меньший чем 60°, положение будет несколько иное.

На рис. 8-11 показано положение якоря при повороте на угол 30°. Лобовые части для простоты показаны только для секций (*3в — 6н*) и (*3н — 6в*). В этом положении указанные секции замкнуты щетками накоротко и, следовательно, исключены из параллельных ветвей обмотки якоря. Напряжение машины теперь определяется суммой э. д. с.

$$U = e_1 + e_2 = e_4 + e_5,$$

а сами e_1 и e_2 будут иметь другие значения, чем при первом положении якоря. Очевидно, напряжение будет меньше, чем при положении якоря, представленном на рис. 8-10.

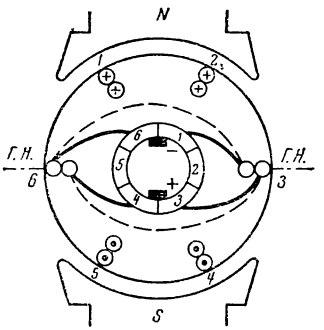


Рис. 8-11. Расположение обмотки при повороте якоря на 30° (сравнить рис. 8-9).

При вращении машины ее напряжение будет непрерывно колебаться в некоторых пределах

$$U_{\text{макс}} \geqslant U \geqslant U_{\text{мин}}.$$

Чем больше секций включено в параллельную ветвь, тем меньше величина пульсаций напряжения U. В современных машинах пульсации настолько малы, что напряжение считают постоянным.

Геометрической нейтралью машины называется плоскость, проходящая через ось вала машины и делящая расстояние между полюсами пополам. Электродвижущая сила, наводимая в секции обмотки, проходящей через геометрическую нейтраль, равна нулю или очень мала. В этот момент времени и происходит замыкание секции щеткой накоротко. О процессах, происходящих при переключении секций из одной параллельной ветви в другую, см. § 8-9.

8-5. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ОБМОТКИ ЯКОРЯ

В главе пятой была выведена формула (5-29) для максимального значения э. д. с., наводимой в обмотке, при изменении магнитного потока, сцепленного с ней:

$$E_{\text{м}} = 2\pi\Phi_{\text{м}}\omega f.$$

В машинах постоянного тока э. д. с. является средним значением суммы э. д. с. всех витков обмотки, входящих в одну параллельную ветвь. Она может быть выражена

$$E = E_{\text{ср}} = \frac{2}{\pi} E_{\text{м}} \qquad (8\text{-}5)$$

или

$$E = \frac{2 \cdot 2\pi}{\pi} \Phi_{\text{м}}\omega f = 4\Phi_{\text{м}}\omega f.$$

Обозначим: N — число всех проводов, входящих в обмотку якоря; $2a$ — число параллельных ветвей обмотки якоря; n — скорость вращения якоря, *об/мин*, тогда

$$w = \frac{N}{2 \cdot 2a} \quad \text{и} \quad f = \frac{pn}{60}.$$

Подставляя эти величины в формулу э. д. с., получаем:

$$E = 4\Phi \frac{N}{2 \cdot 2a} \frac{pn}{60} = \Phi N \frac{p}{a} \frac{n}{60}. \tag{8-6}$$

В этой формуле $N \frac{p}{a\,60}$ — величина постоянная, обозначив ее через c_E, получим:

$$E = c_E \Phi n, \tag{8-7}$$

т. е. э. д. с. машины пропорциональна магнитному потоку ее и скорости вращения якоря.

8-6. МОМЕНТ НА ВАЛУ МАШИНЫ

Независимо от того, в каком режиме работает машина — генератором или электродвигателем, на каждый провод якоря действует электромагнитная сила

$$F_{\text{пр}} = B_{\text{ср}} l I = \frac{\Phi 2p}{\pi d l} l I,$$

где $B_{\text{ср}}$ — среднее значение магнитной индукции;
d и l — диаметр и длина якоря;
$\Phi 2p$ — полный поток многополюсной машины;
$I = \frac{I_{\text{я}}}{2a}$ — ток одной параллельной ветви, т. е. одного провода.

Полная сила, действующая на N проводов якоря по касательной к окружности якоря:

$$F = F_{\text{пр}} N = \frac{\Phi 2p}{\pi d} \frac{I_{\text{я}}}{2a} N = \frac{p}{\pi d a} N \Phi I_{\text{я}}.$$

Момент машины

$$M = F \frac{d}{2} = \frac{p}{2\pi a} N \Phi I_{\text{я}} = c_{\text{м}} \Phi I_{\text{я}}, \tag{8-8}$$

где $c_{\text{м}} = \frac{p}{2\pi a} N$ — постоянная величина.

Если машина работает генератором, момент будет тормозной ($M_т$); при работе ее электродвигателем момент будет вращающим ($M_в$). Момент равен произведению тока якоря и потока машины.

8-7. МЕХАНИЧЕСКАЯ МОЩНОСТЬ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электрическая машина преобразует механическую энергию в электрическую или электрическую в механическую. При этом механическая мощность

$$P_м = Fv.$$

Так как $F = \frac{2M}{d}$, а $v = \omega \frac{d}{2}$, то

$$P_м = \frac{2M}{d} \omega \frac{d}{2} = M\omega. \qquad (8\text{-}9)$$

Подставляя сюда выражение (8-8) для момента, получаем:

$$P_м = \frac{p}{2\pi a} N\Phi I_я \frac{2\pi n}{60} = \Phi N \frac{p}{a} \frac{n}{60} I_я = EI_я. \qquad (8\text{-}10)$$

Таким образом, развиваемая якорем машины механическая мощность равна ее электрической мощности, т. е. произведению электродвижущей силы и тока якоря. При работе машины генератором мощность $EI_я$ больше, чем мощность $UI_я$, отдаваемая потребителю, так как $E > U$. Когда машина работает электродвигателем и, значит, $E < U$, тогда мощность $EI_я$ меньше мощности $UI_я$, подаваемой из сети. Эта разница мощностей численно равна мощности тепловых потерь $I^2 r_я$ в обмотке якоря.

8-8. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ

Когда машина работает генератором вхолостую, т. е. при $I_я = 0$, магнитный поток возбуждения $\Phi_в$, создаваемый н. с. $F_в$, существует один и проходит от северного полюса к южному через якорь (рис. 8-12). В этом случае индукция B_δ в воздушном зазоре, в пределах полюсного наконечника, остается практически постоянной.

Если генератор нагружен, т. е. по обмотке якоря проходит ток, якорь сам становится электромагнитом и его н. с. $F_я$ создает второй поток — п о п е р е ч н ы й п о т о к

якоря $\Phi_я$. Он замыкается через воздушный зазор машины и поперек ее полюсов, уменьшая индукцию в воздушном зазоре B_δ под одним краем полюса (левым у северного и правым у южного) и увеличивая B_δ под другим краем (правым у северного и левым у южного) (рис. 8-13). По отношению к направлению вращения якоря можно сказать, что набегающий край полюса размагничивается, а сбегающий — намагничивается.

Суммарный поток машины Ф смещен в направлении вращения якоря; в ту же сторону смещена нейтраль машины, называемая в данном случае физической

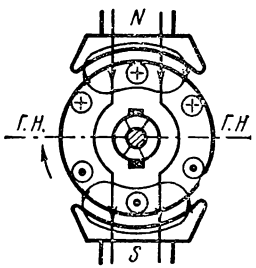


Рис. 8-12. Поперечная реакция якоря.

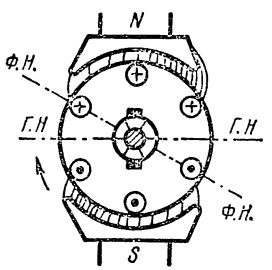


Рис. 8-13. Перераспределение магнитной индукции от реакции якоря.

(ф. н.). В результате поток Ф при нагрузке несколько уменьшается, так как вследствие насыщения стали размагничивание на набегающем краю полюса оказывается бо́льшим, чем намагничивание на сбегающем. Влияние н. с. якоря на величину магнитного потока машины при нагрузке называется реакцией якоря.

В современных машинах постоянного тока, нормального исполнения уменьшение магнитного потока под влиянием реакции якоря незначительно.

Главная опасность этого явления, как будет показано ниже, заключается в том, что магнитная индукция в воздушном зазоре под краем полюса может сильно возрастать.

Если машина работает электродвигателем, то при направлении тока в якоре, указанном на рис. 8-12, якорь будет вращаться в обратную сторону. Следовательно, реакция якоря будет сдвигать поток Ф и ф. н. против хода якоря.

8-9. КОММУТАЦИЯ ТОКА

В предыдущих параграфах (рис. 8-9 и 8-10) было показано, что при вращении якоря каждая секция обмотки переключается коллектором из одной параллельной ветви в другую, оставаясь некоторое время замкнутой накоротко. Переключение секции и совокупность всех явлений, происходящих в ней при этом, называется коммутацией. Время T, в течение которого секция остается замкнутой накоротко, называется периодом коммутации.

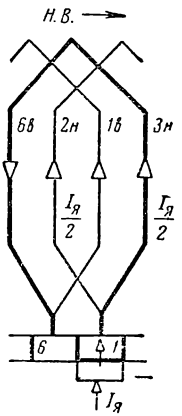


Рис. 8-14. Начало коммутации ($t = 0$).

Если при коммутации обнаруживается искрение на коллекторе, то это может привести в негодность щетки и коллектор, и машина может выйти из строя. Рассмотрим упрощенно причины плохой коммутации и способы ее улучшения.

Представим себе секцию (*3н—6в*) (рис. 8-9 и 8-10) отдельно на рис. 8-14 и допустим, что секция вращается очень медленно ($T \approx \infty$), ширина щетки равна ширине коллекторной пластины и что всеми сопротивлениями, кроме сопротивления переходного слоя между щеткой и коллектором, можно пренебречь. Ток $I_я$ переходит из щетки через сопротивление переходного слоя $r_п = R$ в коллекторную пластину *1*, а затем разделится на два равных тока $I = 0{,}5\ I_я$, идущих: один в параллельную ветвь с проводами *3н—6в—1в* и т. д., а другой — с проводами *2н* и т. д.

Как только щетка коснется коллекторной пластины *6*, начнется коммутация, и ток в секции начнет уменьшаться. Действительно, если при $t = \frac{T}{10}$ 0,9 контактной поверхности щетка касается коллекторной пластины *1*, а 0,1 — касается пластины *6*, то ток, проходящий через коллекторную пластину *1*, равен 0,9 $I_я$, а через пластину *6* — 0,1 $I_я$. Токи в параллельных ветвях при неизменном $I_я$ по-прежнему должны быть равны по 0,5 $I_я$, а, следовательно, ток в короткозамкнутой секции i_c имеет прежнее направление и величина его равна 0,9 $I_я$ — 0,5 $I_я$ = 0,4 $I_я$. Ток другой параллельной ветви складывается из тока короткозамкнутой

секции 0,4 $I_я$ и тока 0,1 $I_я$, идущего от щетки в коллекторную пластину *6*, т. е. тоже равен 0,4 $I_я$ + 0,1 $I_я$ = 0,5 $I_я$. Таким образом, ток в короткозамкнутой секции уменьшается пропорционально времени t и в положении, показанном на рис. 8-15, т. е. при $t = \frac{T}{2}$ равен нулю. Дальше ток в секции начинает нарастать, но уже в обратном направлении и к моменту $t = T$, представленному на рис. 8-16, опять равен 0,5 $I_я$, так как секция разомкнулась и переключена в правую параллельную ветвь. Зависимость $i_c = f(t)$ показана на рис. 8-17, *а* и представляет прямую линию. Такой должна быть коммутация в каждой хорошо построенной машине.

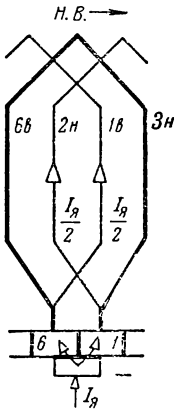


Рис. 8-15. Средина времени коммутации $\left(t = \frac{T}{2}\right)$.

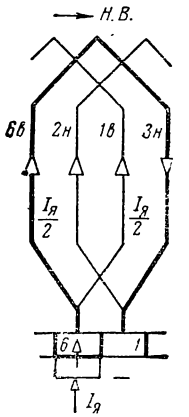


Рис. 8-16. Конец коммутации ($t = T$).

Однако, чтобы получить прямолинейную коммутацию, нами было принято, что $T \approx \infty$. На самом деле время коммутации длится тысячные доли секунды и, значит, ток i_c в секции изменяется очень быстро. При этом, как известно, в секции возникает э. д. с. самоиндукции e_s. Поскольку зависимость $i_c = f(t)$ — прямая линия, т. е. $\frac{di_c}{dt} = \operatorname{tg}\alpha = \text{const}$, то величина $e_s = -L_c \frac{di_c}{dt}$ постоянна. Разделив величину e_s на сопротивление короткозамкнутой секции, можно получить

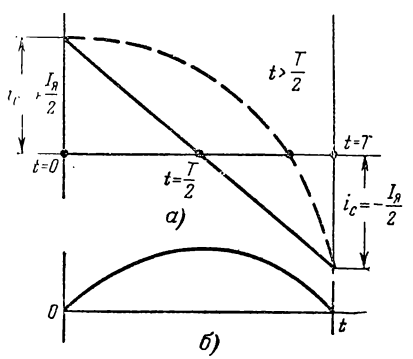


Рис. 8-17. Коммутация при естественных условиях.

значение добавочного тока i_s, вызванного э. д. с. самоиндукции e_s:

$$i_s = \frac{e_s}{r_6 + r_1},$$

где r_6 и r_1 — сопротивления переходного слоя части щетки, набегающей на шестую коллекторную пластину, и остальной части щетки, сбегающей с первой пластины. Сопротивление самой секции ничтожно мало по сравнению с r_6 и r_1.

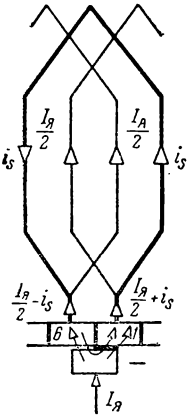


Рис. 8-18. Распределение токов при замедленной коммутации.

Для момента $t = \frac{T}{2}$ (рис. 8-15) $r_6 + r_1 = 2R + 2R = 4R$, а для $t = 0$ и $t = T$ $r_6 + r_1 = \infty$. Вычисленные на основании этих соображений значения тока $i_s = f(t)$ показаны на рис. 8-17, *б*. Сумма токов секции ($i_c + i_s$) при наличии э. д. с. самоиндукции, т. е. в реальных условиях, показана на рис. 8-17, *а* пунктиром.

Коммутация в этом случае называется з а м е д л е н н о й, ибо э. д. с. e_s затягивает процесс изменения тока в секции, поддерживая его, когда он убывает, и препятствуя его нарастанию в конце периода коммутации. На рис. 8-18 показано распределение токов для момента $t = \frac{T}{2}$ при наличии э. д. с. e_s. При этом оказывается, что плотность тока на набегающем краю щетки уменьшается, а на сбегающем — увеличивается, вызывая дополнительный нагрев и износ щетки сверх расчетного.

Но главная опасность, вызываемая замедленной коммутацией, это искрение между щеткой и коллектором на сбегающем краю щетки. Вызывается оно эффектом размыкания короткозамкнутой секции в конце коммутации. В это время запасенная секцией электромагнитная энергия $\frac{1}{2} L_c i_s^2$ выделяется в электрической дуге у сбегающего края щетки. Работа машины допустима, если при номинальном режиме работы искрение, определяемое на глаз, не превосходит следующих с т е п е н е й:

Степень 1 — отсутствие искр (темная коммутация).

Степень $1^1/_4$ — слабое точечное искрение под небольшой частью щетки. В этих случаях нет почернения коллектора и нагара на щетках.

Степень $1^1/_2$ — слабое искрение под большой частью щетки. При этом появляются следы почернения на коллекторе, легко устраняемые протиранием поверхности коллектора тряпкой, смоченной в бензине, а также следы нагара на щетках.

Для улучшения коммутации принимается ряд мер. Чтобы уменьшить ток i_s, переходное сопротивление делают

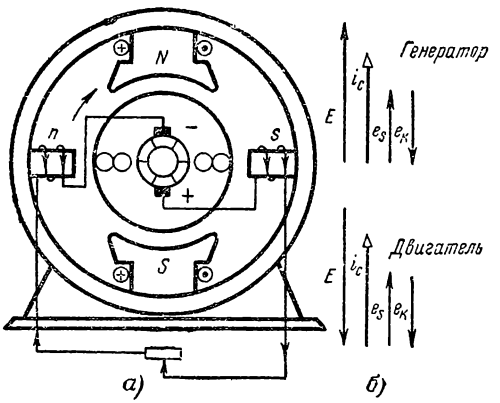


Рис. 8-19. Дополнительные полюсы.

большим, применяя графитные щетки в машинах нормального типа и угольно-графитные или электрографитированные—в тяговых, крановых машинах и двигателях прокатных станов. В низковольтных машинах (автотракторные, электролизные и др.) применяют медно-графитные щетки. Щетки подбираются опытным путем на испытательном стенде завода и поэтому заменять изношенную щетку можно только щеткой той же марки.

Радикальной мерой улучшения коммутации является применение дополнительных полюсов (рис. 8-19). При этом уничтожается э. д. с. самоиндукции, а значит и дополнительный ток i_s. Они располагаются на геометрической нейтрали и в случае работы машины генератором чередуются с главными полюсами в направлении вращения якоря, как указано на рис. 8-19, *а*. Действие их заключается в следующем. Когда секция, попадая на гео-

метрическую нейтраль, замыкается щеткой накоротко, э. д. с. машины E и убывающий ток секции i_c (рис. 8-17, *б*) имеют одно направление. Электродвижущая сила самоиндукции e_s поддерживает убывающий ток, а значит направлена так же, как э. д. с. E. Поэтому, для компенсации e_s в секции должна дополнительно наводиться э. д. с. коммутации $e_к$, встречная э. д. с. самоиндукции. Условно это показано на рис. 8-19, *б*. Это и выполняется, если для генератора, вслед за главным полюсом N, установить в направлении вращения дополнительный s (рис. 8-19, *а*). Если установить $e_к = e_s$, то дополнительный ток секции i_s будет равен нулю и коммутация станет прямолинейной.

При работе машины двигателем, при том же направлении тока в якоре и той же полярности главных полюсов направление вращения якоря будет обратным и э. д. с. E встречна току. Следовательно, э. д. с. $e_к$ должна совпадать с э. д. с. E (рис. 8-19, *б*) и чередование полюсов для этого случая будет $NnSs$.

Для того чтобы компенсация э. д. с. самоиндукции происходила автоматически, при всех нагрузках, обмотка дополнительных полюсов соединяется последовательно с обмоткой якоря (рис. 8-19, *а*) и полюсы делаются ненасыщенными. В этом случае $e_к \equiv \Phi_{дп} \equiv I_я$. Так как $e_s \equiv I_я$, то она компенсируется э. д. с. $e_к$ при любой нагрузке. В действительности процесс коммутации значительно сложнее, чем был описан.

При эксплуатации машин постоянного тока необходимо считаться с возможностью возникновения «кругового огня по коллектору», который приводит к тяжелой аварии машины. Сущность явления в следующем.

Если магнитная индукция в воздушном зазоре B_δ постоянна, то, разделив напряжение машины на число коллекторных пластин, лежащих между двумя разноименными щетками, находят среднее напряжение между двумя лежащими рядом коллекторными пластинами ($U_{ср}$) или, что то же, напряжение, создаваемое одной секцией (рис. 8-9). Это напряжение должно быть меньше того, которое способно поддержать электрическую дугу между пластинами, если она по каким-либо причинам возникнет.

Практически напряжение между некоторыми пластинами оказывается выше, чем $U_{ср}$, особенно благодаря поперечной реакции якоря (§ 8-8), увеличивающей индукцию под краем полюса на 30—50%. Тогда в секции, а значит и

между коллекторными пластинами, к которым она припаяна, получается повышенное напряжение. Это особенно наблюдается у мощных машин, работающих с большой толчкообразной перегрузкой.

При перегрузке под сбегающим краем щетки образуется сильное искрение, ионизирующее воздух вокруг коллектора. Если напряжение между двумя коллекторными пластинами способно поддержать электрическую дугу, то она возникает, растягивается по коллекторным пластинам, может перекрыть разноименные щетки и перебросится на корпус машины. Против этого явления в машинах постоянного тока принимаются специальные конструктивные меры.

8-10. ТИПЫ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Генераторы разделяются на несколько типов, отличающихся друг от друга по своим эксплуатационным свойствам, зависящим в основном от способа питания их обмоток возбуждения.

Генератором с независимым возбуждением (рис. 8-20, *а*) называется такой, у которого ток $I_в$ в обмотку возбуждения (*в*) поступает от постороннего, независимого источника энергии. Эти генераторы применяются в автоматических устройствах и там, где напряжение на зажимах якоря малое (6—8 *в*) или высокое (свыше 500 *в*). Все остальные машины, показанные на рис. 8-20, называются генераторами с самовозбуждением. Их обмотки возбуждения питаются от их собственных якорей.

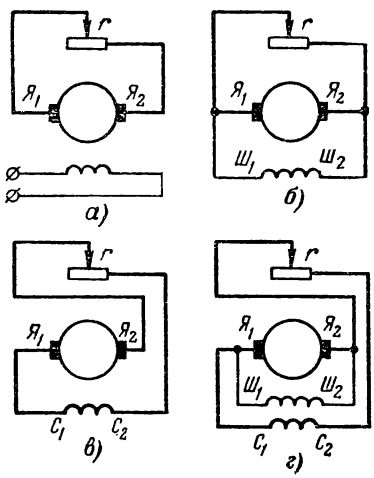


Рис. 8-20. Схемы соединения обмоток возбуждения с якорем.

а — независимое; *б* — параллельное; *в* — последовательное; *г* — смешанное.

Генератором с параллельным возбуждением (рис. 8-20, *б*) называется такой, обмотка возбуждения которого присоединяется к зажимам якоря *Я* парал-

лельно внешней цепи r. Удобство этого генератора в том, что он не требует дополнительного источника энергии для питания обмотки возбуждения, и поэтому он очень распространен.

Генератор с последовательным возбуждением (рис. 8-20, *в*) имеет обмотку возбуждения, соединенную последовательно с внешней цепью. Он применяется только как машина специального назначения.

Генератор смешанного возбуждения (рис. 8-20, *г*) имеет две обмотки возбуждения, последовательную (сериесную *С*) и параллельную (шунтовую *Ш*). Он обладает улучшенными свойствами генератора параллельного возбуждения, но по стоимости дороже его.

Эксплуатационные свойства электрических машин характеризуются кривыми (графиками), коротко называемыми характеристиками. Они представляют зависимость между двумя величинами, при всех остальных, сохраняющих постоянные значения. Например, зависимость напряжения генератора U от тока нагрузки I при постоянных скорости вращения n и токе возбуждения $I_в$, т. е.

$$U = f(I)$$

при $n = \text{const}$ и $I_в = \text{const}$.

По осям абсцисс и ординат откладывают или абсолютные значения величин или их относительные значения (в долях или в процентах, так называемых номинальных значений).

Номинальными значениями называются обозначенные на щитке машины или в ее паспорте величины, при которых обеспечена нормальная эксплуатация машины в условиях определенной окружающей обстановки. Эти величины отмечают индексом «н», например: мощность $P_н$, напряжение $U_н$, ток $I_н$, скорость вращения $n_н$ и т. д.

8-11. ГЕНЕРАТОР С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Схема генератора дана на рис. 8-21. К обмотке возбуждения подводится ток возбуждения $I_в$ от независимого источника энергии. Для регулирования этого тока служит реостат $r_ш$, имеющий добавочный контакт. При установке движка реостата на этот контакт обмотка возбуждения замыкается накоротко. При отсутствии этого контакта запасенная в магнитном поле энергия при размыкании цепи возбуждения будет вызывать электрическую дугу между

последним контактом и движком реостата. В результате контакты оплавляются. Кроме того, при большой индуктивности обмотки возбуждения возникающая при разрыве ее э. д. с. самоиндукции настолько велика, что может вызвать пробой межвитковой изоляции обмотки и может быть опасна для обслуживающего персонала.

К зажимам якоря присоединяются вольтметр и амперметр, измеряющие напряжение U и ток $I = I_я$, проходящий по нагрузке (r). Предполагается, что генератор приводится во вращение первичным двигателем, не показанным на рис. 8-21.

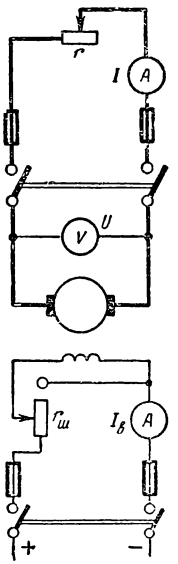


Рис. 8-21. Схема соединения генератора независимого возбуждения.

Характеристика холостого хода это зависимость э. д. с. холостого хода $E_0 = U_0$ от тока возбуждения $I_в$ при постоянной скорости вращения и при токе нагрузки $I = 0$, т. е.

$$E_0 = f(I_в)$$

при $n = \text{const}$ и $I = 0$.

Так как $E_0 \equiv \Phi$, то в другом масштабе она является магнитной характеристикой машины. Она снимается для проверки теоретических расчетов магнитной цепи машины.

Для ее получения вращают якорь генератора с постоянной скоростью $n = n_н$ при разомкнутых зажимах якоря. Включив рубильник цепи возбуждения, увеличивают постепенно ток возбуждения $I_в$ до тех пор, пока напряжение генератора U_0 достигнет величины (1,1—1,2) $U_н$. Записав значения $I_в$ и U_0, уменьшают постепенно ток возбуждения, продолжая измерять и записывать величины $I_в$ и U_0. По полученным данным строят график, показанный на рис. 8-22. Как видно, при разомкнутой цепи возбуждения, когда $I_в = 0$, напряжение $U_0 = (2 — 2{,}5\%)\ U_н$. Оно называется остаточной э. д. с. $E_{ост}$. Точка, соответствующая номинальному напряжению $U_н$, обычно лежит на колене кривой — при токе $I_{вх}$, называемом током возбуждения, при холостом ходе и номинальном напряжении.

Внешняя характеристика генератора — это зависимость величины напряжения генератора от

изменения нагрузки, т. е. тока внешней цепи при неизменных скорости вращения и токе возбуждения:

$$U = f(I)$$

при $I_в = \text{const}$ и $n = \text{const}$.
Эта характеристика показана на рис. 8-23.

Якорь генератора приводят во вращение со скоростью $n = n_н$ и возбуждают до напряжения $U \approx (1{,}1 — 1{,}2)\, U_н$. После этого замыкают рубильник внешней цепи и умень-

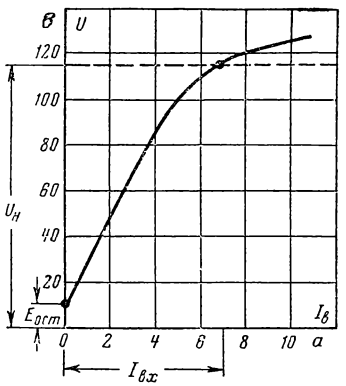


Рис. 8-22. Характеристика холостого хода генератора.

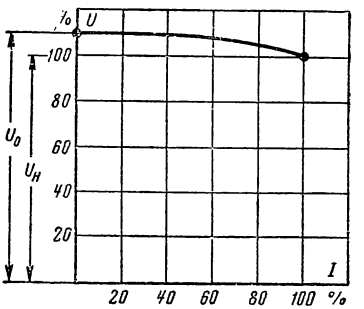


Рис. 8-23. Внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением.

шают сопротивление нагрузки r, регулируя ток возбуждения так, чтобы при $I = I_н$ установилось номинальное напряжение $U_н$. Это будет первая точка характеристики. Затем, увеличивая сопротивление r при неизменных токе возбуждения и скорости вращения, разгружают генератор до холостого хода. Записывая значения U и I, строят характеристику.

При разгрузке э. д. с. и напряжение генератора возрастают вследствие уменьшения размагничивающего действия реакции якоря и уменьшения падения напряжения в обмотке якоря $Ir_я$, так как $U = E — Ir_я$. Характеристика (рис. 8-23) построена в процентах, где за 100% приняты номинальные значения $U_н$ и $I_н$.

Каждый тип генератора характеризуется величиной

$$\Delta U\% = \frac{U_0 — U_н}{U_н} 100\%, \qquad (8\text{-}11)$$

называемой процентным изменением напряжения. Для генераторов с независимым возбуждением $\Delta U\% = 5—10\%$. Такое колебание напряжения при изменении нагрузки не приемлемо для большинства потребителей и возникает необходимость поддержания его постоянным.

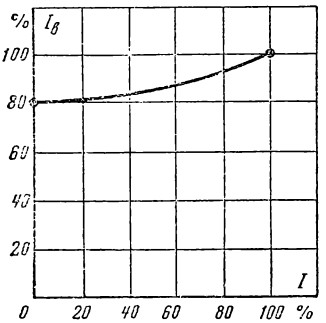


Рис. 8-24. Регулировочная характеристика генератора с независимым возбуждением.

Регулировочная характеристика показывает, как надо регулировать ток возбуждения $I_в$, чтобы при изменении тока I напряжение U оставалось постоянным, т. е.

$$I_в = f(I)$$

при $U = \text{const}$ и $n = \text{const}$.

Установив $U = U_н$, при $I = I_н$ разгружают генератор до холостого хода, уменьшая ток возбуждения $I_в$ так, чтобы напряжение оставалось неизменным. Записывая токи I и $I_в$, строят регулировочную характеристику (рис. 8-24).

8-12. ГЕНЕРАТОР С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Схема генератора с параллельным возбуждением дана на рис. 8-25. Обмотка возбуждения присоединяется к зажимам якоря и при номинальном напряжении ток возбуждения в ней составляет обычно 2—3% номинального тока якоря.

Этот генератор возбуждается только тогда, когда магнитный поток, созданный током возбуждения, совпадает по направлению с потоком остаточной индукции. В этом случае ток в обмотке возбуждения, созданный остаточной э. д. с. $E_{ост}$, подмагничивает машину, магнитный поток генератора нарастает и э. д. с. увеличивается. Вследствие этого ток возбуждения возрастает, что вызывает новое увеличение магнитного потока. Этот процесс самовозбуждения идет до тех пор, пока э. д. с. не становится равной падению напряжения в обмотке возбуждения, т. е.

$$E = I_в r_в.$$

Характеристика холостого хода этого генератора, практически, имеет тот же вид, что и для генератора с независи-

мым возбуждением и получается способом, указанным выше.

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения

$$U = f(I)$$

при $n = \text{const}$ и $r_в = \text{const}$ (рис. 8-26, кривая *1*) снимается так же, как и для генератора с независимым возбуждением (кривая *2*), но идет круче последней. Дело в том, что ток в параллельной обмотке возбуждения при разгрузке генератора не остается

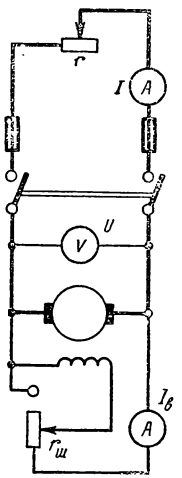


Рис. 8-25. Схема соединения генератора с параллельным возбуждением.

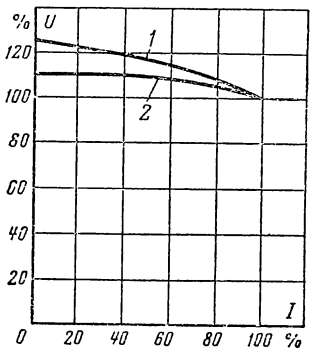


Рис. 8-26. Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением.

постоянным, а растет с ростом напряжения, так как сопротивление $r_в$ постоянно. Это вызывает рост магнитного потока и э. д. с. генератора, а процентное изменение напряжения $\Delta U\%$ достигает 30%.

Регулировочные характеристики двух описанных выше генераторов снимаются одинаково и имеют один и тот же вид.

8-13. ГЕНЕРАТОР С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Схема соединения генератора с последовательным возбуждением была дана на рис. 8-20, *в*. Так как через обмотку возбуждения проходит весь ток якоря, то ее сопротивление

делается того же порядка, что и сопротивление якоря. В этом генераторе напряжение на зажимах определяется как разность э. д. с. и суммарного падения напряжения в обмотках

$$U = E - I(r_я + r_в). \qquad (8\text{-}12)$$

Внешняя характеристика генератора дана на рис. 8-27 и представляет зависимость напряжения генератора от тока нагрузки при постоянной скорости вращения и при токе возбуждения, равном току якоря, т. е.

$$U = f(I)$$

при $n = \text{const}$ и $I_в = I$.

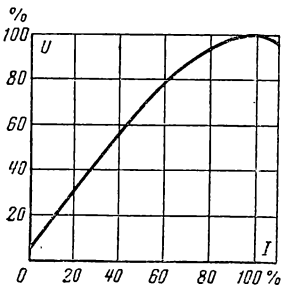


Рис. 8-27. Внешняя характеристика генератора с последовательным возбуждением.

С увеличением тока, пока он еще мал, магнитный поток растет пропорционально току. Так же нарастает и напряжение генератора U, мало отличающееся от э. д. с., пропорциональной магнитному потоку. При нагрузках, близких к номинальной, машина насыщается, что вместе с увеличением действия реакции якоря замедляет рост магнитного потока, а значит и э. д. с. Падение напряжения в обмотках якоря и возбуждения сильно возрастает и напряжение согласно выражению (8-12) начинает падать. Таким образом, напряжение генератора сильно меняется при колебаниях нагрузки, что исключает его применение в обычных условиях.

8-14. ГЕНЕРАТОР СО СМЕШАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Две обмотки возбуждения генератора (рис. 8-28) — параллельная (шунтовая) и последовательная (сериесная) находятся на одних и тех же полюсных сердечниках. Таким образом, в генераторе совмещаются свойства машин с параллельным и с последовательным возбуждением. Обычно обе обмотки соединяются с якорем так, что их н. с. складываются. Такое соединение называется согласным.

Внешняя характеристика этого генератора, т. е.

$$U = f(I)$$

при $n = \text{const}$ и $r_в = \text{const}$ показана на рис. 8-29. Как видно, напряжение генератора остается практически постоянным в пределах изменения нагрузки от нуля до номинальной. Это происходит потому, что последовательная обмотка с увеличением нагрузки подмагничивает генератор, поддерживая его э. д. с. Способность генератора автоматически поддерживать напряжение почти постоянным ценна в сетях с сильно и часто меняющейся нагрузкой.

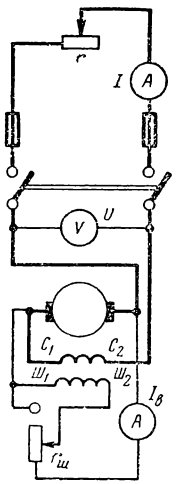


Рис. 8-28. Схема соединения генератора смешанного возбуждения.

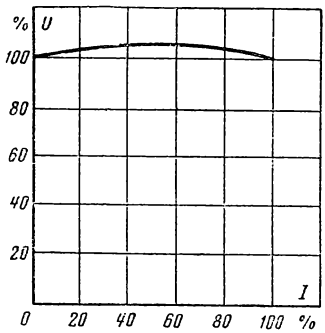


Рис. 8-29. Внешняя характеристика генератора со смешанным возбуждением.

8-15. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРОВ

Необходимость параллельной работы генераторов вызывается двумя причинами. Первая, это повышение к. п. д. работы генераторов. Действительно, можно установить один генератор на полную мощность потребителя или два генератора на половинную мощность каждый. Если в течение суток величина нагрузки меняется, то в первом случае мощный генератор будет много часов работать недогруженным, т. е. с пониженным к. п. д. Во втором случае при полной потребляемой мощности могут работать два генератора параллельно, а при уменьшении нагрузки один из генераторов можно отключать, загружая полностью второй. Такая работа будет экономичней.

Вторая причина — необходимость иметь меньший аварийный резерв. В первом случае потребуется резервный генератор на 100% мощности потребителя, а во втором только на 50%.

Параллельной работой называется такая, при которой генераторы подключены к общим шинам одно-

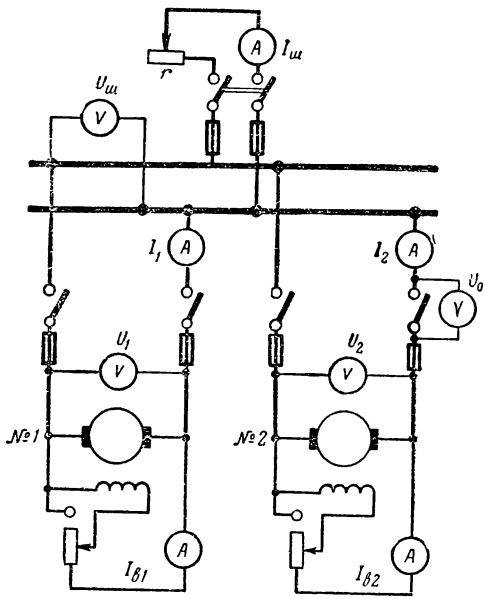


Рис. 8-30. Схема включения на параллельную работу генераторов параллельного возбуждения.

именными зажимами. Ниже рассматривается параллельная работа только генераторов параллельного возбуждения.

На рис. 8-30 показаны два генератора, которые должны работать параллельно. Для этого их надо сначала включить. Если генератор № *1* уже включен на шины и работает, то, приведя во вращение с номинальной скоростью якорь генератора № *2*, увеличивают его ток возбуждения $I_{в2}$ до тех пор, пока напряжение U_2 не станет равным $U_1 = U_ш$. Замкнув левый нож рубильника № *2*, проверяют разность потенциалов между его правыми, разомкнутыми зажимами. При $U_1 = U_2$ показание вольтметра U_0 должно равняться

нулю. Тогда правый нож можно замкнуть и включение законечно. Если этот вольтметр покажет $U_0 = U_1 + U_2$, включать генератор № *2* нельзя и концы проводов его, подходящие к шинам, надо поменять местами.

После включения ток второго генератора I_2 равен нулю, так как его э. д. с. $E_2 = U_2$ равна $U_ш$. Включенный генератор должен быть нагружен. Это требуется в двух случаях: если нагрузка на шинах возрастает, или при той же нагрузке надо разгрузить генератор № *1*. Однако при всех операциях изменения нагрузки генераторов потребитель энергии не должен иметь помех в работе, а это значит, что напряжение на шинах должно быть постоянным. Проследим перевод нагрузки с генератора № *1* на генератор № *2* на простом примере.

Пусть сопротивления якорей генераторов № *1* и № *2* равны ($r_{я1} = r_{я2} = 0{,}02$ *ом*). Генератор № *1* уже работает при $U_1 = U_ш = 115$ *в* и $I_1 = I_ш = 200$ *а*. Тогда его э. д. с. $E_1 = U_ш + I_1 r_{я1} = 115 + 200 \cdot 0{,}02 = 119$ *в*. После подключения генератора № *2* его $U_2 = U_ш = E_2 = 115$ *в*, а $I_2 = 0$. Если увеличить ток возбуждения $I_{в2}$ генератора № *2* так, что его э. д. с. E_2 становится равной, например 116 *в*, то одновременно с этим следует уменьшить ток возбуждения $I_{в1}$ генератора № *1* так, чтобы напряжение на шинах осталось неизменным. Тогда во втором генераторе будет проходить ток

$$I_2 = \frac{E_2 - U_ш}{r_{я2}} = \frac{116 - 115}{0{,}02} = 50\ а.$$

Так как напряжение $U_ш = \text{const}$, то и $I_ш = 200\ а = \text{const}$, следовательно, ток первой параллельной ветви (генератор № *1*) уменьшится до значения $I_1 = I_ш - I_2 = 200 - 50 = 150$ *а*. Это получилось потому, что при уменьшении тока $I_{в1}$ уменьшилась э. д. с. E_1 до значения $E_1 = U_ш + I_1 r_1 = 115 + 150 \cdot 0{,}02 = 118$ *в*.

Таким образом, при переводе нагрузки ток возбуждения нагружаемого генератора увеличивают, а у разгружаемого уменьшают так, чтобы напряжение на шинах оставалось постоянным.

Естественно, что у нагружаемого генератора тормозной момент увеличивается, а у разгружаемого — уменьшается и автоматические регуляторы первичных двигателей в первом случае увеличивают подачу энергии, а во втором — уменьшают.

Если токи возбуждения генераторов оставлять неизменными, то общая нагрузка делится генераторами примерно обратно пропорционально сопротивлениям их якорей. Обычно сопротивления якорей генераторов бывают почти обратно пропорциональны номинальным мощностям генераторов и значит

$$\frac{r_{я2}}{r_{я1}} : \frac{I_1}{I_2} : \frac{P_{1н}}{P_{2н}},$$

т. е. нагрузка делится генераторами пропорционально их номинальным мощностям, если эти мощности одного порядка.

8-16. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Изобретение электродвигателя относится к 1834 г. и было сделано Б. С. Якоби.

Как было сказано выше, одна и та же машина может работать генератором или электродвигателем. Падение напряжения в обмотке якоря машины, работающей генератором, составляет при номинальном токе ($I_н$) 4—10% номинального напряжения ($U_н$). Естественно, что и при работе ее электродвигателем падение напряжения должно быть тем же. Но если к неподвижному электродвигателю приложить напряжение $U = U_н$, то его ток

$$I_я = \frac{U_н}{r_я}$$

будет превышать номинальный в 25—10 раз. Так как это недопустимо, то при пуске приложенное напряжение к якорю должно быть уменьшено на 96—90% номинального напряжения. Таким аппаратом, снижающим подводимое к якорю двигателя напряжение, является *пусковой реостат*, включаемый последовательно с обмоткой якоря.

Тогда пусковой ток

$$I_п = \frac{U_н}{r_я + r_р}. \qquad (8\text{-}13)$$

Сопротивление реостата $r_р$ подбирается так, чтобы ток при пуске $I_п$ равнялся $(1{,}5 — 2{,}0)\ I_н$.

Если якорь приходит во вращение, то в его обмотке постепенно нарастает противо-э. д. с. Ток в этом случае определяется

$$I_я = \frac{U - E}{r_я + r_р}.$$

Чем больше скорость, а значит, и э. д. с., тем меньше ток и тем скорее отпадает надобность в сопротивлении реостата $r_р$. К концу пуска оно совершенно выключается и ток якоря [формула (8-4)]:

$$I_я = \frac{U - E}{r_я}. \tag{8-14}$$

При установившемся режиме работы, при $I_я = I_н$ противо-э. д. с., наводимая в якоре, очевидно, составит (96—90)% $U_н$, а при холостом ходе (нагрузка на валу равна нулю), когда ток якоря $I_я = I_х \approx (5 — 10)\% I_н$, противо-э. д. с. будет больше, доходя до 99% $U_н$.

Согласно формуле (8-7):

$$E = c_E n \Phi,$$

скорость вращения электродвигателя

$$n = \frac{1}{c_E} \frac{E}{\Phi}. \tag{8-15}$$

Скорость вращения пропорциональна наводимой в якоре э. д. с. и обратно пропорциональна магнитному потоку Ф.

Сравнивая формулы (8-4) и (8-15), получаем:

$$n = \frac{1}{c_E} \frac{U - I_я r_я}{\Phi}. \tag{8-16}$$

Вращающий момент электродвигателя и мощность, развиваемая им с учетом потери на трение, в соответствии с формулами (8-8) и (8-10) могут быть выражены

$$M = c_м I_я \Phi;$$
$$P = E I_я = c_E I_я \Phi n.$$

С увеличением нагрузки на валу ток I электродвигателя растет, так как растет потребляемая мощность $P_1 = U I_я$, а напряжение U остается неизменным. Увеличение тока происходит до тех пор, пока растущий вращающий момент электродвигателя не уравновесит тормозной момент на валу. При каждой нагрузке двигателя устанавливается соответствующая ей скорость вращения. По своим эксплуатационным свойствам электродвигатели, как и генераторы, делятся на четыре типа: с независимым, параллельным, последовательным и смешанным возбуждением.

8-17. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Схема электродвигателя с параллельным возбуждением показана на рис. 8-31. Перед замыканием рубильника необходимо убедиться, что ручка *1* пускового реостата *2* стоит на холостом контакте *0*. Ручка реостата в цепи возбуждения (шунтового реостата — ШР) должна стоять в положении, при котором сопротивление реостата минимально (рис. 8-31).

При замыкании рубильника и переводе ручки *1* на первый рабочий контакт, ток I, поступающий в электродвигатель, разделится на два тока — $I_я$, идущий в якорь через все секции пускового реостата $r_р$, и $I_в$, идущий по металлической дуге *3* в обмотку возбуждения.

Таким образом,

$$I = I_я + I_в, \qquad (8\text{-}17)$$

где $I_в \approx (1 - 7)\,\%\, I_н$.

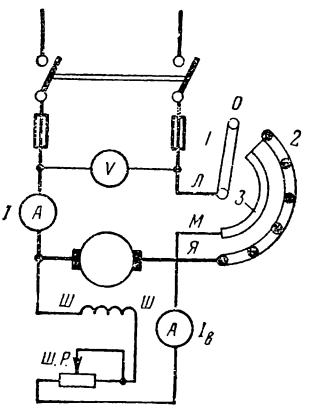


Рис. 8-31. Схема соединения двигателя с параллельным возбуждением.

После первого броска тока $I_п \approx (1{,}5—2{,}0)\, I_н$, с увеличением скорости вращения ток якоря начинает уменьшаться и ручка пускового реостата *1* переводится на второй контакт. Ток опять, увеличившись броском, начинает уменьшаться и ручку реостата переводят на следующий контакт и т. д. Пуск заканчивается, когда все сопротивление $r_р$ выключено. Пусковое сопротивление $r_р$ нельзя оставлять длительно под током, так как оно рассчитано на кратковременную работу.

Во время пуска желательно, чтобы ток I уменьшался быстрее, а для этого должна быстрее нарастать противо-э. д. с. Поэтому при пуске обязательно создают наибольший магнитный поток Ф, устанавливая $I_в = I_{в,макс}$. Это необходимо также и потому, что электродвигатель при пуске должен развивать большой вращающий момент, который, как известно, пропорционален магнитному потоку [формула (8-8)].

Для отключения электродвигателя сначала переводят ручку пускового реостата на нулевой контакт, а затем размыкают рубильник. При этом исключается подгорание кон-

тактов рубильника. Схема соединения двигателя должна быть такой, при которой исключена возможность размыкания цепи обмотки возбуждения (рис. 8-31).

Для удобства монтажа зажимы пускового реостата обозначаются буквами: *Л* — для присоединения к питающей линии; *Я* — к якорю и *М* — к обмотке возбуждения.

Характеристики электродвигателей представляют главным образом графики изменения механических свойств машины.

Скоростной характеристикой называется зависимость скорости вращения n от тока I при постоянных напряжении U и токе возбуждения $I_в$, т. е.

$$n = f(I)$$

при $U = \text{const}$ и $I_в = \text{const}$. Она представлена на рис. 8-32 кривой *1*. При холостом ходе, когда $I_х < 10\% I_н$, скорость наибольшая, так как $I_х r_я \approx 0$:

$$n_х = \frac{1}{c_E} \frac{U - I_х r_я}{\Phi} \approx \frac{1}{c_E} \frac{U}{\Phi}. \quad (8\text{-}18)$$

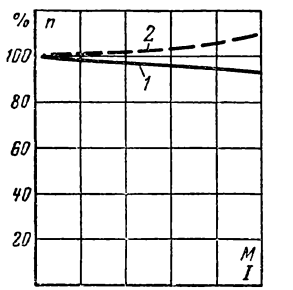


Рис. 8-32. Скоростная характеристика двигателя с параллельным возбуждением.

С увеличением нагрузки на валу растет $Ir_я$ и скорость должна уменьшаться. В то же время реакция якоря уменьшает магнитный поток Ф, вследствие чего скорость должна возрастать. В существующих электродвигателях увеличение падения напряжения влияет на скорость сильнее и она с увеличением нагрузки на валу всегда падает, хотя и незначительно (5—10)%$n_ц$, так как $I_н r_я$ не превышает 10% $U_н$. Такая характеристика скорости называется жесткой.

При $I_в = \text{const}$ магнитный поток $\Phi \approx \text{const}$ и тогда вращающий момент электродвигателя

$$M = c_м I \Phi \approx (c_м \Phi) I \quad (8\text{-}19)$$

пропорционален току I. Поэтому, изменив масштаб по оси абсцисс на рис. 8-32, получают механическую характеристику электродвигателя, т. е.

$$n = f(M)$$

при $U = \text{const}$ и $I_в = \text{const}$.

Рабочие характеристики, даваемые обычно во всех каталогах и описаниях электродвигателя, особенно ценны для эксплуатации и представляют собою зависимость

$$n,\ M,\ I,\ \eta = f(P_2)$$

при $U = \text{const}$ и $I_в = \text{const}$, где η — к. п. д. машины, а P_2 — полезная мощность на валу (рис. 8-33).

Развиваемая на валу (полезная) мощность электродвигателя

$$P_2 = \frac{M 2\pi n}{60},$$

а вращающий момент

$$M = \frac{P_2 \cdot 60}{2\pi n}. \qquad (8\text{-}20)$$

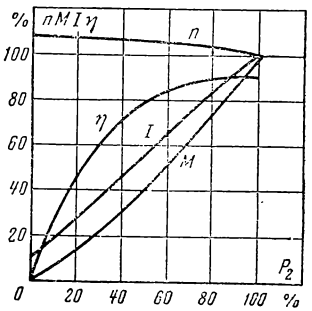


Рис. 8-33. Рабочие характеристики двигателя с параллельным возбуждением.

Зависимость $M = f(P_2)$ при постоянной скорости вращения была бы прямой линией ($M \equiv P_2$), проходящей через начало координат. Однако с увеличением P_2 скорость несколько уменьшается и момент растет быстрее, чем по прямой линии. Ток I также почти пропорционален мощности на валу P_2, так как при постоянном напряжении ток пропорционален потребляемой мощности $P_1 = UI$, а потери электродвигателя $(P_1 - P_2)$ малы. При холостом ходе, когда $P_2 = 0$, ток $I_х$ не равен нулю и кривая не проходит через начало координат.

Электродвигатель с параллельным возбуждением является лучшим из регулируемых электродвигателей. Он позволяет плавно и экономично регулировать скорость вращения. Регулирование производится почти исключительно изменением тока возбуждения. Причины этого в следующем: вращающий момент электродвигателя $M = C_м I \Phi$ при неизменном потоке Φ пропорционален току I. Ток в свою очередь определяется отношением

$$I = \frac{U - E}{r_я},$$

т. е. разностью $U - E$, которая не превышает (6—10)% $U_н$. Предположим, что $U_н = 100\%$, $E = 95\%\ U_н$ и $(U - E) =$

$= 5\%\ U_н$. Если уменьшить ток возбуждения на 5%, то приблизительно на 5% уменьшится магнитный поток и э. д. с. Тогда разность $U - E$ увеличится до величины, почти $10\%\ U_н$, а ток возрастет, почти в 2 раза. Отсюда ясно, что вращающий момент электродвигателя возрастет и скорость увеличится. Этот способ очень экономичен ввиду того, что $I_в \approx (1 - 7)\%\ I_н$ и потери энергии при регулировании $I_в^2 r_в$ малы.

Регулировать скорость вращения можно и включением добавочного сопротивления последовательно с якорем. Однако этот способ очень не экономичен и применяется редко, в специальных устройствах.

Электродвигатели с параллельным возбуждением применяются там, где нужна практически постоянная скорость при разных нагрузках или где требуется регулирование скорости до 1 : 1,5, а в специальном исполнении — до 1 : 4.

8-18. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Схема включения электродвигателя с последовательным возбуждением показана на рис. 8-34. Для включения электродвигателя необходим пусковой реостат, так как суммарное сопротивление обмоток якоря и возбуждения очень мало. Все сказанное ранее о пуске электродвигателей относится и к этому электродвигателю. Ток, потребляемый электродвигателем при работе, равен

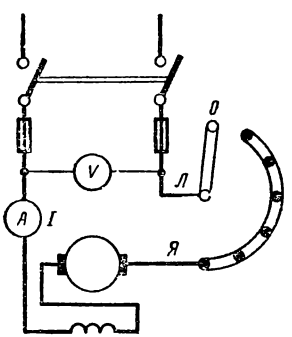


Рис. 8-34. Двигатель с последовательным возбуждением.

$$I = I_я = I_в = \frac{U - E}{r_я + r_в}. \quad (8\text{-}21)$$

При малых токах (25—50% $I_н$) поток машины пропорционален току ($\Phi \equiv I$) и

$$M = c_м I\Phi = cII = cI^2, \quad (8\text{-}22)$$

т. е. момент пропорционален квадрату тока. При токах, близких к номинальному и более, момент становится пропорциональным первой степени тока, как в электродвигателе с параллельным возбуждением.

Скорость электродвигателя

$$n = \frac{1}{c_E} \frac{U - I(r_я + r_в)}{\Phi} \qquad (8\text{-}23)$$

с увеличением нагрузки резко падает ввиду одновременного увеличения магнитного потока Ф и падения напряжения $I(r_я + r_в)$. Такая характеристика называется м я г к о й. Поэтому электродвигатель применяется в тех устройствах, где допустимо значительное уменьшение скорости при увеличении нагрузки, а также, когда электродвигатель должен развивать большой вращающий момент. Такими устройствами являются подъемники, краны и особенно электрическая тяга.

Зависимость скорости вращения и момента от полезной мощности на валу, о которых говорилось выше, показана на рис. 8-35.

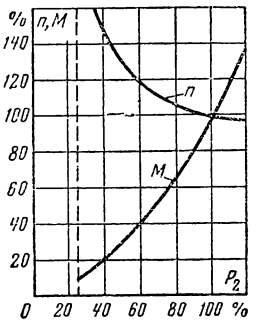


Рис. 8-35. Характеристики скорости и вращающего момента двигателя с последовательным возбуждением.

При нагрузках, меньших (25—30)% $P_{2н}$, электродвигатель вращается с недопустимо большой скоростью, так как магнитный поток его сильно уменьшается. Такой режим из-за опасности механического повреждения якоря от центробежных сил может быть допущен только для электродвигателей мощностью в несколько десятков ватт.

Регулирование скорости электродвигателя экономично только в многодвигательном приводе (электрические дороги), что достигается применением специальных схем. Регулирование включением сопротивления последовательно с якорем или шунтированием обмотки возбуждения для уменьшения магнитного потока неэкономично.

8-19. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ СО СМЕШАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Электродвигатель со смешанным возбуждением должен, очевидно, обладать свойствами электродвигателей с параллельным и последовательным возбуждением (рис. 8-36). Обе обмотки возбуждения соединяются согласно, т. е. так, чтобы их н. с. и, значит, потоки $\Phi_ш$ и $\Phi_с$ складывались.

Тогда

$$n = \frac{1}{c_E} \frac{U - I_я (r_я + r_с)}{\Phi_ш + \Phi_с} \tag{8-24}$$

и

$$M = c_м I_я (\Phi_ш + \Phi_с). \tag{8-25}$$

Смешанное возбуждение электродвигателей применяется в двух случаях.

В одном, когда скоростная характеристика должна быть мягкой, но более жесткой, чем у электродвигателей с последовательным возбуждением. Это электроприводы с использованием маховиков (ножницы, прессы и др.). Известно, что энергия вращающегося маховика может быть использована только при изменении скорости вращения. Когда нагрузка нарастает быстро (толчком), электродвигатель с мягкой характеристикой стремится снизить скорость, а маховик по инерции стремится эту скорость поддержать и запасенная им кинетическая энергия превращается в работу механизма. Такая совместная работа маховика и электродвигателя дает возможность выбирать последний на меньшую мощность.

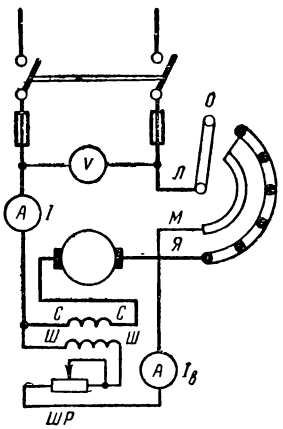


Рис. 8-36. Схема включения двигателя со смешанным возбуждением.

Во втором случае электродвигатель имеет жесткую скоростную характеристику, являясь машиной с параллельным возбуждением. Существуют электродвигатели постоянного тока с малым воздушным зазором между якорем и полюсами и с большой величиной тока якоря, приходящейся на единицу окружности якоря. В таких электродвигателях влияние реакции якоря на скорость вращения больше, чем влияние падения напряжения в якоре [см. формулу (8—18)], и скорость с увеличением нагрузки не падает, а нарастает (рис. 8-32, кривая *2*), что недопустимо. Если поставить дополнительно последовательную (стабилизирующую) обмотку, то работа электродвигателя станет устойчивой.

Электродвигатели постоянного тока с независимым возбуждением являются двигателями специального назначения и о них сказано в гл. 12.

8-20. ПОТЕРИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Работа каждой электрической машины сопровождается потерями энергии: в стали, от трения, в меди обмоток и добавочными.

Потери в стали $P_{ст}$, или магнитные, возникают при перемагничивании тела якоря и полюсных наконечников, от гистерезиса и вихревых токов. Мощность потерь зависит от частоты перемагничивания $f = \frac{pn}{60}$ и максимального значения магнитной индукции $B_м$.

Потери механические $P_{мех}$, или потери от трения, получаются в подшипниках, при трении вращающихся частей о воздух и трения щеток о коллектор. Мощность механических потерь пропорциональна скорости вращения машины n. Потери $P_{ст} + P_{мех}$ постоянны, при постоянной скорости вращения и неизменном токе возбуждения $I_в$ и не зависят от нагрузки машины. Они называются потерями холостого хода $P_х$.

Потери электрические возникают при прохождении тока по обмотке якоря и переходному контакту между щетками и коллектором, а также во всех обмотках возбуждения и дополнительных полюсов

$$P_э = I_я^2 r_я + P_щ + I_я^2 r_{дп} + I_я^2 r_с + UI_в.$$

Потери в щеточном контакте $P_щ = 2\Delta U_щ I_я$ определяются по падению напряжения $\Delta U_щ$, которое принимается: 2 *в* — для угольных, графитных и электрографитированных щеток и 0,6 *в* — для металлоугольных щеток.

Потери добавочные $P_{доб}$ в обмотке и стали якоря вызываются искажением магнитного поля реакцией якоря и полями, возникающими вокруг секций, в которых происходит коммутация. Эти потери оцениваются от 0,01 до 0,005 $U_н I_н$ и считаются пропорциональными $I_я^2$.

Как известно, к. п. д. называется отношение полезной мощности машины P_2 к полной мощности P_1, получаемой машиной. Тогда для генератора

$$\eta_г = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI}{UI + (P_{ст} + P_{мех} + P_э + P_{доб})} 100\%. \quad (8\text{-}26)$$

Для электродвигателя

$$\eta_{дв} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI - (P_{ст} + P_{мех} + P_э + P_{доб})}{UI} 100\%. \quad (8\text{-}27)$$

Изменение величины к. п. д. от нагрузки показано на рис. 8-33. При малых нагрузках к. п. д. мал, так как полезная мощность P_2 мала, а потери холостого хода P_x значительны по сравнению с P_2. Потери холостого хода постоянны и поэтому с ростом полезной мощности к. п. д. быстро нарастает. В дальнейшем пропорционально квадрату тока увеличиваются электрические потери $P_э$, рост к. п. д. замедляется и величина его, достигнув некоторого максимума, начинает уменьшаться. Наибольшее значение к. п. д. обычно наступает при (75—100)% $P_н$, и равно 70—93%. Бо́льшие цифры относятся к машинам большей мощности.

8-21. ГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСВАРКИ

При электрической дуговой сварке напряжение между электродом и деталью, подлежащей сварке, резко меняется. Когда электрод касается детали, получается короткое замыкание и напряжение равно нулю. После возникновения электрической дуги

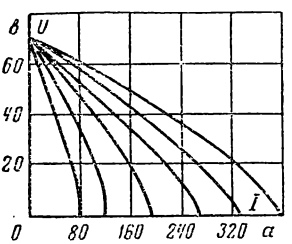


Рис. 8-37. Внешние характеристики генератора для электрической дуговой сварки.

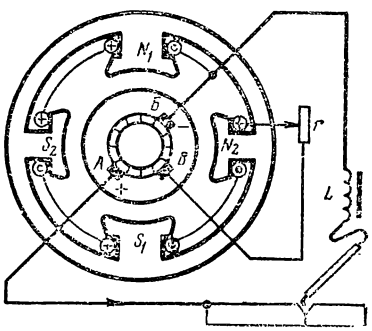


Рис. 8-38. Генератор для электрической дуговой сварки.

напряжение тем больше, чем дальше электрод отстоит от детали. Однако для качественной сварки необходимо поддерживать величину тока по возможности постоянной. В этом случае внешняя характеристика генератора должна иметь вид, представленный на рис. 8-37. В машине, с круто падающей характеристикой, ток остается

практически неизменным при значительных колебаниях напряжения.

Генератор, имеющий такую характеристику, показан на рис. 8-38. Он имеет как бы расщепленные полюсы N_1N_2 и S_1S_2. Обмотки возбуждения полюсов, соединенные последовательно, подключены к щеткам *Б* и *В*. Полюсы N_1S_1 слабо насыщены, а полюсы N_2S_2 насыщены сильно, путем уменьшения сечения сердечников.

Когда от главных щеток *А*, *Б* берется при сварке ток $I_я$, то реакция якоря сильно размагничивает полюсы N_1S_1 и почти не влияет на поток полюсов N_2S_2. Напряжение между щетками *А*, *Б* сильно падает, а между щетками *Б*, *В* практически не меняется, почему и ток возбуждения остается постоянным. Установка наибольшей величины сварочного тока достигается реостатом *r*, а для сглаживания пульсаций тока служит дроссель *L*.

8-22. ТРЕХЩЕТОЧНЫЙ ГЕНЕРАТОР

Трехщеточный генератор применяется, как источник тока на автомашинах (рис. 8-39). Его главные щетки *А* и *Б* всегда приключены к цепи, состоящей из аккумулятора и источников света, соединенных параллельно. Без аккумулятора генератор работать не может.

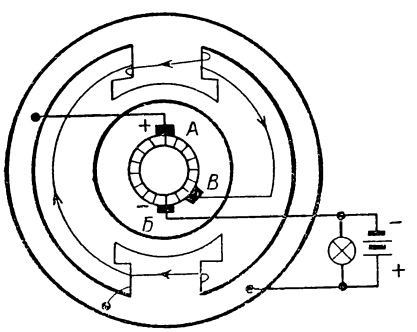


Рис. 8-39. Схема генератора для автомашин.

В автомашинах скорость вращения генератора меняется в широких пределах (около 6 : 1), а напряжение генератора при любой скорости должно оставаться постоянным. Это достигается подключением цепи возбуждения генератора к щеткам *А* и *В*, снимающим напряжение с части обмотки якоря. Эта часть всегда находится под набегающими концами полюсов, которые в работе сильно размагничиваются реакцией якоря. Когда скорость увеличивается, растет э. д. с. и ток; одновременно увеличивается и размагничивающее действие реакции якоря. Последняя уменьшает э. д. с.

в части обмотки якоря, находящейся между щетками A, B, а значит уменьшает и ток в обмотке возбуждения. Благодаря этому напряжение между щетками A, $Б$ остается практически постоянным.

Если скорость вращения так мала, что э. д. с. генератора становится меньше напряжения аккумулятора, генератор отключается специальным реле. Таким образом, источники света, стартер, сигнал питаются от аккумулятора, а при некоторой скорости — от аккумулятора и генератора, работающих параллельно. В последнем случае генератор подзаряжает аккумуляторную батарею, если его э. д. с. становится больше напряжения аккумулятора.

В последнее время на автомашинах применяются обычные генераторы, а постоянство напряжения их поддерживается при помощи специальных регуляторов вибрационного типа.

8-23. ЭЛЕКТРОМАШИННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ (ЭМУ)

В ряде производств приходится управлять большими мощностями при помощи слабых сигналов, посылаемых датчиками (§ 7-8). Эти сигналы должны быть усилены усилителями, одним из которых является ЭМУ, показанный на рис. 8-40.

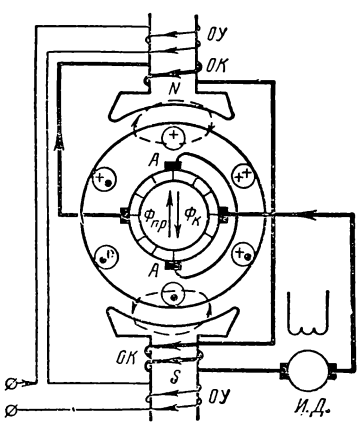


Рис. 8-40. Электромашинный усилитель.

Это машина постоянного тока, имеющая якорь обычного типа, а статор (станину) с выступающими полюсами, как показано на рис. 8-40, или цилиндрического типа. На станине могут быть расположены несколько обмоток управления, одна из которых *ОУ* показана на рис. 8-40. Ток управления $I_у$, от датчика, создает продольный магнитный поток, направленный от полюса N к полюсу S. При вращении якоря в его проводах, показанных на рис. 8-40 кружками, наводится э. д. с. E_1. Щетки A, A замкнуты накоротко и поэтому по проводам якоря проходит значительный ток I_1,

направление которого нанесено в проводах, ближе к поверхности якоря. Таким образом, поданная к усилителю мощность $U_у I_у$ увеличивается до мощности $E_1 I_1$, превосходящей первую во много раз. Конечно, это «усиление» происходит за счет мощности первичного электродвигателя, вращающего якорь.

Ток I_1 создает поперечное магнитное поле якоря (см. § 8-8), неподвижное в пространстве и являющееся рабочим полем машины. Обмотка якоря вращается в этом поле, и в ней наводится вторая э. д. с. E_2, и ток I_2, показанный на рис. 8-40, в проводах ближе к центру якоря. Так как поперечный поток велик, то мощность $E_2 I_2$, посылаемая к исполнителю сигнала ИД (электродвигателю), значительно больше мощности $E_1 I_1$. Общее усиление сигнала

$$k_у = \frac{E_2 I_2}{U_у I_у}$$

может быть получено до 10 000. Таким образом, мощность сигнала в 1 *вт* может быть усилена до 10 *квт*. Современные ЭМУ выполняются на мощность от десятых долей киловатта до нескольких десятков киловатт. Электромашинный усилитель обладает ценным свойством малой инерционности, т. е. быстро отзывается на изменение сигнала.

На полюсах ЭМУ (рис. 8-40) помещена еще одна обмотка, соединяемая последовательно с рабочей цепью. Она называется компенсационной (*ОК*) и без нее усилитель работать не может. Ее н. с. направлена встречно н. с., созданной током I_2, и автоматически компенсирует последнюю. В противном случае машина была бы размагничена продольным потоком якоря, созданным током I_2 и направленным встречно потоку полюсов.

8-24. СХЕМА ГЕНЕРАТОР — ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ (Г — ЭД)

Схема генератор — электродвигатель, показанная на рис. 8-41, дает возможность экономично, плавно и в широких пределах регулировать скорость вращения электродвигателя, приводящего в движение станок.

Сам электродвигатель *1* присоединяется без пускового реостата к генератору *2*, предназначенному для питания этого электродвигателя. Генератор и электродвигатель имеют независимое возбуждение, подаваемое от специального генератора *3*, называемого возбудителем. Агрегат —

генератор *2* и возбудитель *3* — приводятся во вращение асинхронным электродвигателем *4*.

Скорость вращения электродвигателя *1* можно менять, регулируя его ток возбуждения реостатом *5* и изменяя ток

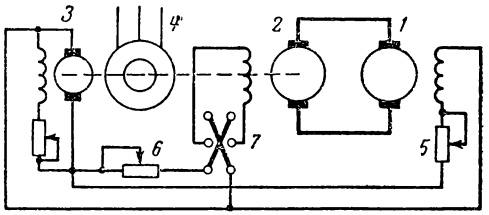


Рис. 8-41. Схема генератор — электродвигатель.

возбуждения генератора *2*, а значит, и напряжение генератора реостатом *6*. Изменяя направление тока, возбуждение генератора *2*, переключателем *7* можно изменять полярность щеток генератора, а значит, и направление вращения электродвигателя *1*.

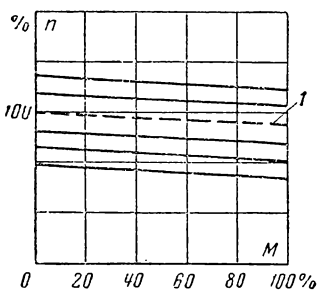


Рис. 8-42. Механические характеристики схемы генератор — электродвигатель.

Эта схема широко применяется в шахтных установках, для привода гребных винтов на судах, на металлургических заводах и для привода металлорежущих станков. На рис. 8-42 показаны механические характеристики агрегата Г—ЭД, подобные приведенной на рис. 8-32. Кривая *1* представляет собой чисто теоретическую характеристику, которая получилась бы при $r_я$ двигателя, равном нулю. Ниже ее расположены характеристики, полученные при регулировании скорости изменением напряжения генератора, а выше — при изменении тока возбуждения двигателя.

Эти характеристики — прямые линии, почти параллельные друг другу и остаются жесткими при регулировании, что очень важно для привода металлорежущих станков. Диапазон регулирования примерно 1 : 20, а в случае применения ЭМУ — 1 : 100 и более.

8-25. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Перед выполнением работы ознакомиться с содержанием § 8-16, 8-17.

План работы

1. Записать основные технические данные испытуемого электродвигателя. Подобрать по этим данным измерительную и вспомогательную аппаратуру и записать ее технические данные.

2. Собрать схему (рис. 8-31) и показать ее руководителю.

3. Произвести пуск электродвигателя в ход. Заметить направление его вращения. Остановить электродвигатель.

4. Изменить направление вращения электродвигателя:

а) путем изменения направления тока в обмотке возбуждения;

б) путем изменения направления тока в обмотке якоря.

5. Произвести пуск электродвигателя. При номинальном напряжении и номинальном токе возбуждения изменять нагрузку электродвигателя от нуля до номинальной, изменяя натяжение тормозной ленты (рис. 8-43).

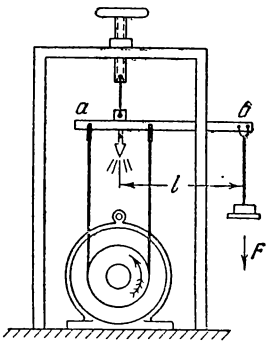


Рис. 8-43. Схема устройства для торможения электродвигателя.

При различных нагрузках отметить U, I, $I_в$, n и F; здесь F — сила, приложенная в конце плеча l, удерживающая рычаг $аб$ в горизонтальном положении.

6. По полученным данным определить:

а) вращающий момент электродвигателя

$$M = Fl\ (кГ \cdot м),$$

где F — в килограмм-силах, l — в метрах;

б) мощность, развиваемая электродвигателем:

$$P_2 = \frac{M2\pi n}{60} = F\frac{2\pi nl}{60}\ (кГ \cdot м/сек);$$

выражая P_2 в ваттах, получаем:

$$P_2 = \frac{M2\pi n}{60 \cdot 0{,}102} = 1{,}03\,Mn;$$

в) к. п. д. электродвигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}\,100\% = \frac{1{,}03Mn}{IU}\,100\%.$$

Результаты наблюдения и расчетов записать в табл. 8-1.

Таблица 8-1

№ наблюдений	Из наблюдений						Из подсчетов				Примечание
	U	I	$I_в$	n	F	l	M	$P_1 = UI$	P_2	η	
	в	*а*	*а*	*об/мин*	*кГ*	*м*	*кГ · м*	*вт*	*вт*	%	

7. По данным наблюдений и расчетов построить рабочие характеристики электродвигателя: n; I; M; $\eta = f(P_2)$ при $U = \text{const}$ и $I_в = \text{const}$.

8. При номинальном напряжении изменять нагрузку электродвигателя от нуля до номинальной, при этом так регулировать ток возбуждения, чтобы скорость вращения электродвигателя осталась неизменной.

По полученным данным построить регулировочную характеристику электродвигателя, т. е. $I_в = f(I)$ при $U = \text{const}$ и $n = \text{const}$.

8-26. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ГЕНЕРАТОР С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Перед выполнением работы ознакомиться с содержанием § 8-10, 8-11 и 8-12.

План работы

1. Записать основные технические данные испытуемого генератора и электродвигателя, предназначенного для вращения генератора. Подобрать по этим данным измерительную и вспомогательную аппаратуру и записать ее технические данные.

2. Собрать схемы электродвигателя (рис. 8-31) и генератора (рис. 8-25) и показать их руководителю.

Таблица 8-2

№ наблюдений	E	$I_в$	n	Примечание
	в	*а*	*об/мин*	

3. При номинальной скорости вращения генератора $n_н$ отметить величину э. д. с. при изменении тока возбуждения от $I_в = 0$ до $I_в = I_{в.н}$. Отмеченные значения записать в табл. 8-2.

По полученным данным построить характеристику холостого хода, т. е. $E = f(I_в)$ при $n = \text{const}$ и $I = 0$.

4. Пользуясь той же схемой соединения, установить номинальную скорость вращения, номинальный ток генератора и номинальное напряжение. Затем, сохраняя неизменными ток возбуждения генератора и скорость его вращения, уменьшать ток генератора от $I = I_н$ до $I = 0$, записывая в табл. 8-3 при различных нагрузках величины I, U, $I_в$ и n.

Таблица 8-3

№ наблюдений	U	I	$I_в$	n	Примечание
	в	*а*	*а*	*об/мин*	

5. Повторить опыт, сохраняя неизменными сопротивление цепи возбуждения и скорость вращения генератора.

6. По полученным данным построить внешнюю характеристику генератора:

а) $U = f(I)$ при $n = \text{const}$ и $I_в = \text{const}$;

б) $U = f(I)$ при $n = \text{const}$ и $r_в = \text{const}$.

Определить процентное изменение напряжения [формула (8—11)].

7. Пользуясь той же схемой соединения при номинальной скорости вращения генератора, изменять величину тока возбуждения так, чтобы при различных значениях тока генератора (от $I = 0$ до $I = I_н$) напряжение на зажимах генератора оставалось неизменным.

Записать в табл. 8-3 величины U, I, $I_в$, n.

По полученным данным построить регулировочную характеристику генератора, т. е. $I_в = f(I)$ при $U = \text{const}$ и $n = \text{const}$.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ТРАНСФОРМАТОРЫ

9-1. НАЗНАЧЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Электрическая энергия, выработанная генераторами электростанций, передается потребителям, находящимся в большинстве случаев на большом расстоянии от станций (см. § 19-1). Для удешевления стоимости электропередачи и

уменьшения потерь энергии в ней приходится повышать напряжение электропередачи до сотен киловольт. При распределении энергии между потребителями необходимо понизить напряжение до десятков и сотен вольт. Все это вызывает необходимость многократного изменения (трансформирования) напряжения, которое осуществляется трансформаторами.

П. Н. Яблочков (1847—1894).

Трансформатором называется статический аппарат, имеющий две (иногда более) обмотки, связанные переменным магнитным полем, служащий для трансформации переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения, при неизменной частоте.

Число трансформаций от станции до потребителя обычно велико, и поэтому на 1 *квт* мощности генераторов, установленных на станции, приходится 4 — 5 *ква* установленной мощности трансформаторов. Суммарные потери электроэнергии в трансформаторах составляют значительную долю потерь всей энергосистемы. Поэтому необходимо, чтобы трансформатор имел очень высокий к. п. д. В современных мощных трансформаторах к. п. д. доходит до 0,995 при номинальной мощности.

Изобретателем трансформатора был выдающийся конструктор и ученый П. Н. Яблочков (1847—1894).

9-2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Работа трансформатора основана на использовании явления взаимоиндукции. Трансформатор (рис. 9-1) имеет обычно две магнитно связанные обмотки *2—2* и *3—3* с разным числом витков, помещенные для усиления магнитной связи на стальном, замкнутом магнитопроводе — сердечнике *1*. Сердечник для уменьшения потерь энергии от вихревых токов набирается из стальных листов толщиной 0,5—0,35 *мм*, а при повышенной частоте тока — из более тонких листов (0,2—0,1 *мм*). Листы, перед сборкой, покры-

ваются с двух сторон лаком для изоляции друг от друга. Трансформаторная сталь содержит 4—5% кремния, при этом сильно уменьшаются потери от гистерезиса и вихревых токов.

Те части сердечника, на которых располагаются обмотки, называются *стержнями*, а части, замыкающие их, называются *ярмом*. Внутреннее пространство между стержнем и ярмом служит для размещения обмоток и называется *окном*.

Сборка сердечника производится «внахлестку». На рис. 9-2 показаны два слоя листов, которые накладываются друг на друга при сборке сердечника трансформатора. При такой сборке достигается минимальный воздушный зазор в стыках.

Листы предварительно стягиваются изолированными болтами в пакеты сначала так, чтобы на стержни можно было надеть изготовленные обмотки (рис. 9-3), а затем окончательно, чтобы после установки обмоток замкнуть магнитопровод. Сечение стержней, получаемое при этом, показано на рис. 9-4 — квадратное при малой мощности, или крестовидное, приближающееся к кругу, при средней и большой мощности трансформаторов.

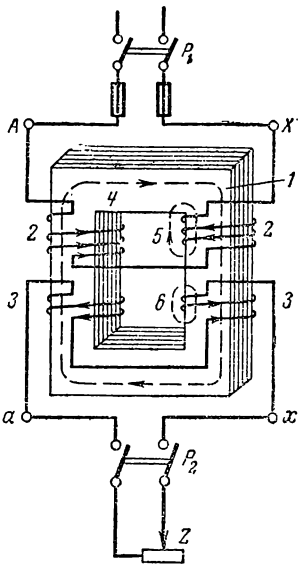


Рис. 9-1. Однофазный трансформатор.

1 — магнитопровод; *2* — обмотка высшего напряжения; *3* — обмотка низшего напряжения; *4* — путь полезного потока; *5* — путь потоков рассеяния первичной обмотки; *6* — путь потоков рассеяния вторичной обмотки.

Обмотки трансформатора представляют собой катушки разных конструкций. Различают обмотку *низшего напряжения* (НН), рассчитанную на низшее напряжение трансформатора, которая помещается ближе к стержню, и обмотку *высшего напряжения* (ВН), рассчитанную на высшее напряжение и помещаемую поверх обмотки (НН), концентрически с ней.

На рис. 9-1 обмотки ВН и НН показаны сдвинутыми друг относительно друга для упрощения рисунка.

В однофазных трансформаторах (рис. 9-1) каждая обмотка делится пополам и помещается на двух стержнях. Обе половины обмотки НН и обмотки ВН соединяются так, чтобы э. д. с. половин обмоток складывались.

Начала и концы обмоток трансформаторов обозначаются буквами латинского алфавита. Начала обмоток обозначают *А*, *Б*, *С* и *а*, *b*, *c*, а концы — *X*, *Y*, *Z* и *x*, *y*, *z*. Заглавные буквы приняты для обмотки высшего напряжения, а строчные — для обмотки низшего напряжения (рис. 9-1).

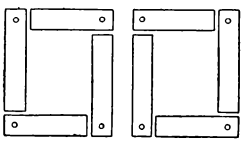


Рис. 9-2. Расположение листов стали однофазного трансформатора при сборке.

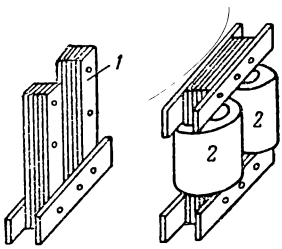


Рис. 9-3. Сборка сердечника трансформатора.

1 — стержень магнитопровода; *2* — обмотки.

Та обмотка, к которой энергия подводится, называется первичной, а та, от которой энергия отдается потребителю, называется вторичной. Энергия передается с первичной обмотки на вторичную при помощи магнитного

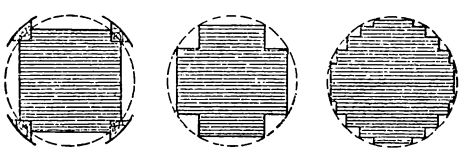


Рис. 9-4. Сечение сердечников трансформаторов.

потока, связывающего обмотки. Если напряжение вторичной обмотки меньше, чем первичной, то трансформатор называется понижающим; в обратном случае он будет повышающим.

Таким образом, трансформатор, показанный на рис. 9-1— понижающий. Однако если к обмотке *ах* подать энергию при номинальном для этой обмотки напряжении, а к об-

мотке AX подключить потребителя, то трансформатор будет повышающим.

Трансформатор с сердечником рассмотренного выше типа называется стержневым. Он наиболее распространен в практике. Однако существуют трансформаторы броневого типа (рис. 9-5), у которых магнитопровод разветвлен и охватывает обмотки как бы броней. Обмотки ВН и НН таких трансформаторов изготовляются в виде плоских катушек, размещающихся на одном и том же стержне. В радиотехнических устройствах применяются трансформаторы броневого типа.

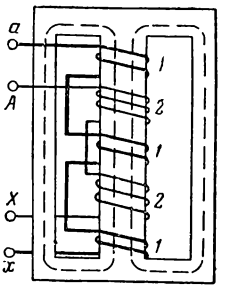


Рис. 9-5. Броневой трансформатор.

Номинальной мощностью трансформатора называется мощность его вторичной обмотки, обозначенная на щитке трансформатора и выраженная в вольт-амперах или киловольт-амперах.

9-3. ХОЛОСТОЙ ХОД ТРАНСФОРМАТОРА

Холостым ходом трансформатора называется такой режим, когда первичная обмотка его подключена к питающей сети, а вторичная разомкнута и тока в ней нет. На рис. 9-1 и 9-6 это будет, если рубильник p_1 включен, а p_2 выключен.

Подведенное к обмотке AX первичное напряжение U_1 изменяется по закону синуса ($u_1 = U_{1м} \sin \omega t$) и под его действием проходит переменный ток холостого хода I_{1x}. Если бы не было стального сердечника, то ток холостого хода был бы реактивным $I_{р.х}$ (см. § 5-8) и, совпадая по фазе с потоком Ф, отставал бы на 90° от напряжения U_1, что показано на векторной диаграмме на рис. 9-7. Практически при холостом ходе ваттметр в цепи первичной обмотки показывает некоторую мощность P_x, являющуюся мощностью потерь в стали сердечника. Потери мощности на нагревание обмотки при холостом ходе ничтожно малы по сравнению с потерями в стали и ими пренебрегают. Таким образом, ток холостого хода $I_{1x} = \sqrt{I_{а.х}^2 + I_{р.х}^2}$, где $I_{а.х} \equiv P_x$ — активная составляющая тока в первичной обмотке.

Благодаря высокому качеству стали $I_{а.х}$ много меньше $I_{р.х}$ и ток $I_{1х}$ отстает от напряжения U_1 на угол, близкий к 90°, а $\cos\varphi_х$ составляет около 0,1. Ток холостого хода составляет 4—10% номинального тока первичной обмотки.

Произведение тока $I_{1х}$ и числа витков первичной обмотки w_1 называется намагничивающей силой трансформатора — $F_{1х} = I_{1х}w_1$. Ею создается

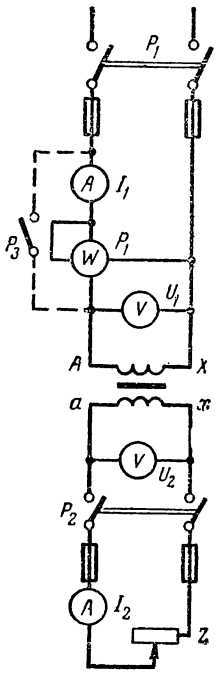


Рис. 9-6. Схема включения трансформатора.

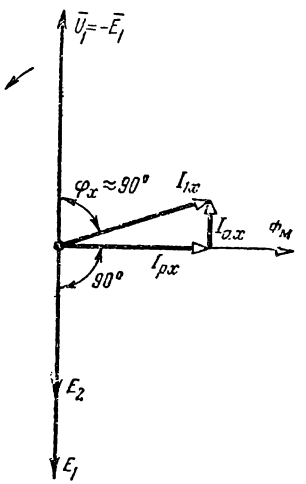


Рис. 9-7. Векторная диаграмма трансформатора при холостом ходе.

магнитный поток трансформатора, большая часть которого $\Phi_м$ замыкается по стали (рис. 9-1). Этот поток сцеплен с обеими обмотками и называется полезным или рабочим. Он наводит в обмотках э. д. с., действующие значения которых [по формуле (5-29)]:

$$E_1 = 4{,}44 f w_1 \Phi_м; \qquad (9\text{-}1)$$

$$E_2 = 4{,}44 f w_2 \Phi_м: \qquad (9\text{-}2)$$

здесь $\Phi_м$ — максимальное значение потока, а w_1 и w_2 — числа витков обмоток. Обе э. д. с. E_1 и E_2 отстают от потока на угол 90° (см. § 5-8) и совпадают на фазе (рис. 9-7).

Незначительное число магнитных линий замыкается по воздуху, как показано на рис. 9-1. Эти линии образуют поток рассеяния $\Phi_{1р}$, который пронизывает только витки первичной обмотки и создает в ней э. д. с. рассеяния:

$$E_{1р} = 4{,}44 f w_1 \Phi_{1р}. \tag{9-3}$$

На основании (§ 5-8):

$$E_{1р} = I_{1х} \omega L = I_{1х} x_1, \tag{9-4}$$

где x_1 называется индуктивным сопротивлением рассеяния первичной обмотки и обусловлено потоком рассеяния. Чем больше насыщение стали и чем хуже собран магнитопровод, тем больше рассеяние и x_1, а значит и падение напряжения в первичной обмотке. Обычно индукция в стали трансформаторов берется 1,0—1,45 и до 1,65 *тл*. Меньшие значения ее принимаются для трансформаторов меньшей мощности.

Падение напряжения в первичной обмотке при холостом ходе $I_{1х}\sqrt{r_1^2 + x_1^2}$ ничтожно мало и тогда, по второму правилу Кирхгофа, мгновенные значения

$$u_1 = -e_1$$

т. е. эти величины равны и сдвинуты по фазе на 180°.

Так как

$$u_1 = U_{1м} \sin \omega t,$$

то

$$e_1 = -U_{1м} \sin \omega t = U_{1м} (\sin \omega t + 180°).$$

Следовательно, действующие значения

$$U_1 = E_1 = 4{,}44 f w_1 \Phi_м$$

равны и сдвинуты по фазе на 180° (см. рис. 9-7).

При холостом ходе ток во вторичной обмотке I_2, а значит и падение напряжения равны нулю. Поэтому мгновенные значения э. д. с. и напряжения равны

$$u_2 = e_2$$

и

$$U_2 = E_2 = 4{,}44 f w_2 \Phi_м.$$

Отношение большей э. д. с. к меньшей

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4{,}44 f w_1 \Phi_м}{4{,}44 f w_2 \Phi_м} = \frac{w_1}{w_2} \tag{9-5}$$

называется коэффициентом трансформации.

При холостом ходе

$$k = \frac{U_1}{U_2}. \tag{9-6}$$

При $\frac{w_1}{w_2} > 1$ трансформатор работает как понижающий, а при $\frac{w_1}{w_2} < 1$ — как повышающий.

На векторной диаграмме холостого хода (рис. 9-7) обе э. д. с. E_1 и E_2 отстают от потока $\Phi_м$ на угол 90°. Так как падение напряжения в первичной обмотке принято равным нулю, то $U_2 = E_2$, а $U_1 = -E_1$.

9-4. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ

Если замкнуть рубильник p_2 (рис. 9-1 и 9-6), то под влиянием э. д. с. E_2 по вторичной обмотке и сопротивлению потребителя z пойдет ток I_2, величина которого определится формулой Ома:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(r_2 + r_п)^2 + (x_2 + x_п)^2}},$$

где r_2 и $r_п$ — активные сопротивления вторичной обмотки и потребителя;

x_2 и $x_п$ — реактивные сопротивления обмотки и потребителя.

Реактивное (индуктивное) сопротивление вторичной обмотки обусловлено ее потоком рассеяния $\Phi_{2р}$.

По закону Ленца наведенная э. д. с. E_2 всегда имеет такое направление, при котором вызванный ею ток I_2 препятствует изменению магнитного потока в магнитопроводе трансформатора. Отсюда следует, что токи I_1 и I_2 обмоток проходят практически встречно друг другу, что и показано на рис. 9-1. В этом случае поток $\Phi_м$ будет создаваться совместным действием н. с. обмоток $F_1 = Iw_1$ и $F_2 = I_2 w_2$, т. е.

$$\overline{F}_1 + \overline{F}_2 = \overline{F}_х, \tag{9-7}$$

что показано на рис. 9-8.

Величина $F_х$ при всех нагрузках трансформатора практически остается постоянной по следующим причинам:

В трансформаторах, даже при $I_1 = I_{1н}$, падение напряжения в первичной обмотке $I_1\sqrt{r_1^2 + x_1^2}$ составляет (2—2,5)%$U_{1н}$. Так как $U_1 = U_{1н}$ постоянно, то $E = 4{,}44fw_1\Phi_м \approx U_{1н} =$ = const; поток $\Phi_м$ и н. с. $F_х$ тоже практически постоянны.

При увеличении I_2 размагничивающее действие F_2 возрастает, а значит, и ток первичной обмотки должен автоматически возрастать так, что величина н. с. F_1 нарастает ровно настолько, насколько увеличивается н. с. F_2, т. е.

$$\bar{F}_1 = \bar{F}_{1х} + (-\bar{F}_2).$$

Как видно из диаграммы на рис. 9-8, с увеличением тока I_2 растет ток I_1, угол φ_1 уменьшается, а коэффициент мощности трансформатора увеличивается от значения $\cos\varphi_х$ до $\cos\varphi_1$.

Если пренебречь величиной н. с. $F_х$, что можно сделать, то

$$F_1 = F_2 \text{ или } I_1w_1 = I_2w_2,$$

откуда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k}. \qquad (9\text{-}8)$$

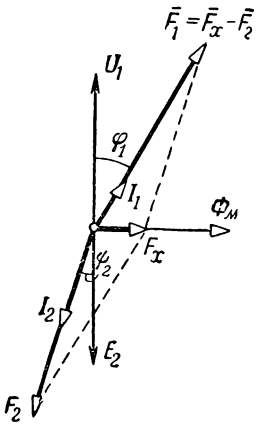


Рис. 9-8. Векторная диаграмма намагничивающих сил.

Потребителя энергии обычно интересует процентное изменение напряжения трансформатора

$$\Delta U\% = \frac{U_{2х} - U_2}{U_{2х}}\,100\%, \qquad (9\text{-}9)$$

т. е. изменение напряжения на вторичных зажимах при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке. Здесь $U_{2х} = U_{2н}$ — номинальное вторичное напряжение.

Эта величина зависит не только от I_2, но и от $\cos\varphi_2$.

В современных трансформаторах, по экономическим и техническим причинам, $\Delta U\%$ рассчитывают порядка 2—3% при $I_2 = I_{2н}$ и $\cos\varphi_2 = 1$.

$U_{2х} - U_2$ зависит от сопротивления обмоток.

Изменение напряжения U_2 трансформатора под влиянием нагрузки можно проследить, рассматривая векторную диаграмму (рис. 9-9), подобную рассмотренной в § 5-9. При холостом ходе э. д. с. E_2 точно равна U_2. При нагрузке

получается падение напряжения во вторичной обмотке $I_2\sqrt{r_2^2+x_2^2}$ и напряжение U_2 становится меньше E_2. Само напряжение численно равно падению напряжения у потребителя $U_2 = I_2\sqrt{r_п^2+x_п^2}$.

Однако э. д. с. E_2 не остается постоянной, а уменьшается, так как несколько уменьшается магнитный поток $\Phi_м$. На рис. 9-10 представлена векторная диаграмма первичной обмотки трансформатора. Со стороны первичной

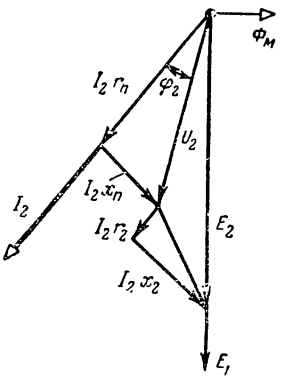


Рис. 9-9. Векторная диаграмма вторичной цепи трансформатора.

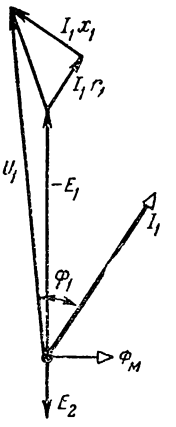


Рис. 9-10. Векторная диаграмма первичной цепи трансформатора.

обмотки трансформатор является приемником энергии, в котором так же как в электродвигателе, создается противо-э. д. с. E_1. Следовательно, неизменное напряжение $U_{1н}$ состоит из части $I_1\sqrt{r_1^2+x_1^2}$, равной падению напряжения в первичной обмотке, и части $-E_1$, уравновешивающей э. д. с. E_1, т. е.

$$\overline{U}_{1н} = -\overline{E}_1 + \overline{I}_1 Z_1. \qquad (9\text{-}10)$$

С увеличением тока I_1 растет $I_1 z_1$, уменьшаются $-E_1$ и поток $\Phi_м$, а следовательно, и E_2.

Таким образом, в формуле (9-9) учтено падение напряжения в обеих обмотках трансформатора.

9-5. ТРЕХФАЗНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

Трансформирование трехфазного тока на мощных трансформаторных подстанциях производится тремя однофазными трансформаторами, соединяемыми в трехфазную группу по правилам, рассмотренным ранее в § 6-2, 6-3. Однако на распределительных подстанциях большей частью применяются специальные трехфазные трансформаторы стержневого типа, представляющие выгоды в стоимости установки по сравнению с трехфазной группой.

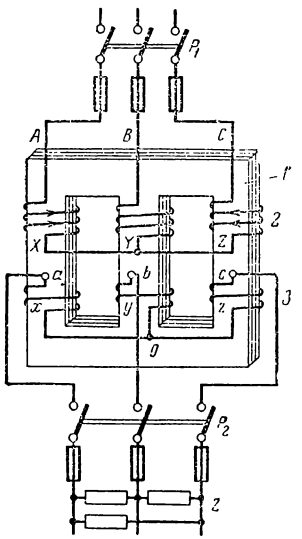


Рис. 9-11. Трехфазный трансформатор.

1 — магнитопровод; *2* — обмотка высшего напряжения; *3* — обмотка низшего напряжения.

Устройство трехфазного трансформатора показано на рис. 9-11. Расположение листов сердечника при сборке дано на рис. 9-12, а сечение стержней на рис. 9-4.

Каждый стержень служит для размещения обмоток одной фазы. Обмотки помещаются концентрически, причем обмотки низшего напряжения ближе к стержню. На рис. 9-11 обмотки условно показаны сдвинутыми одна от другой по оси стержня. Как первичные, так и вторичные обмотки могут соединяться в звезду (Y) или в треугольник (Δ). Однако ГОСТ оставляет только три схемы: звезда — звезда с нулем (Y/Y_0), звезда — треугольник (Y/Δ) и звезда с нулем — треугольник (Y_0/Δ). Числитель в обозначении показывает соединение обмотки ВН, знаменатель — НН.

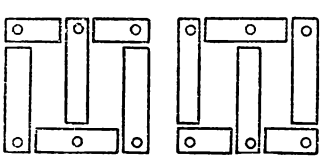


Рис. 9-12. Листы стали при сборке трехфазного трансформатора.

При соединении первичных и вторичных обмоток в звезду или треугольник, в трехфазных трансформаторах, надо иметь в виду, что обмотки связаны магнитно (рис. 9-11):

поток Φ_A замыкается через стержни B и C, поток Φ_B — через стержни A и C и поток Φ_C — через стержни A и B. Намагничивающие токи в обмотках, например в AX, BY, CZ, всегда сдвинуты по фазе, как показано на рис. 9-13.

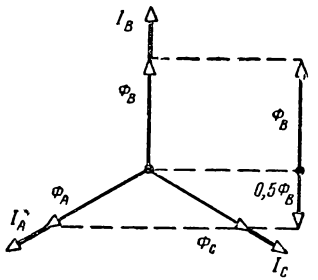


Рис. 9-13. Векторная диаграмма потоков трехфазного трансформатора.

Совпадающие с токами потоки стержней Φ_A, Φ_B, Φ_C, очевидно, в каждый момент времени дадут сумму

$$\overline{\Phi}_A + \overline{\Phi}_B + \overline{\Phi}_C = 0. \quad (9\text{-}11)$$

В частности, для одного момента времени на рис. 9-13 $\overline{\Phi}_A + \overline{\Phi}_B + \overline{\Phi}_C = -0{,}5\Phi_{Bм} + \Phi_{Bм} - 0{,}5\Phi_{Bм} = 0$. Это условие будет соблюдено только тогда, когда, например, в звезду соединить или концы X, Y, Z, или начала A, B, C. Условие (9-11) не будет соблюдено, если соединить вместе зажимы X, B, Z. Таким образом, возникает вопрос о принудительном наименовании начал и концов обмоток, при соединении их в звезду или треугольник, чего не требуется в обмотках, не связанных магнитно.

Если смотреть на трансформатор сверху (рис. 9-11), то можно видеть, что обмотки навиты по стрелке часов (вправо). Такая намотка называется правой (бывает и левая обмотка). Тогда, приняв верхние концы проводов за начала A, B, C, нижние надо считать концами X, Y, Z; можно сделать и наоборот. То же самое относится и к вторичной обмотке. Для соединения обмоток, указанного на рис. 9-11, звезда фазных э. д. с. представлена на рис. 9-14. Соединение вместе зажимов x, b, z недопустимо, так как вектор э. д. с. E_b повернется при этом на 180° и напряжение между зажимами a, c будет линейным, а между ay и cy — фазным.

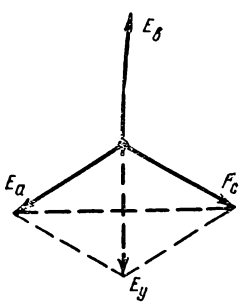


Рис. 9-14. Звезда фазных э. д. с. вторичной обмотки.

На щитке трансформатора за обозначением схемы соединений обмоток стоит цифра: Y/Y_0-12, Y/Δ-11, Y_0/Δ-11. Цифра условно обозначает так называемую

группу соединения трансформатора. Группа указывает угловой сдвиг линейной э. д. с. обмотки низшего напряжения относительно линейной э. д. с. высшего напряжения по часовой стрелке. За единицу принят угол 30°. Таким образом, при группе 12 сдвиг равен 360°, а при группе 11—330°. Группу необходимо знать при включении трансформаторов на параллельную работу.

Определим группу соединения трансформатора, показанного на рис. 9-11. Если при разомкнутом рубильнике p_2 включить рубильник p_1, то диаграмма потенциалов зажимов A, B, C изобразится представленной на рис. 9-15 (точки A, B, C). Соединим электрические зажимы A и a. Тогда точки A и a на диаграмме совместятся как точки равного потенциала. Все обмотки правые и, значит, вторичные э. д. с. во всех фазах совпадают по фазе с первичными. Поэтому, отложив от точки a вектор E_a в фазе с E_A, найдем на диаграмме потенциал нулевой точки вторичной обмотки (точка O). Построив векторы U_b и U_c в фазе с U_B и U_C, получим звезду вторичных э. д. с. На диаграмме можно видеть, что сдвиг вторичного линейного напряжения U_{ab} относительно первичного линейного напряжения U_{AB} равен нулю или 360°. Группа соединения двенадцатая, так как 360 : 30 = 12.

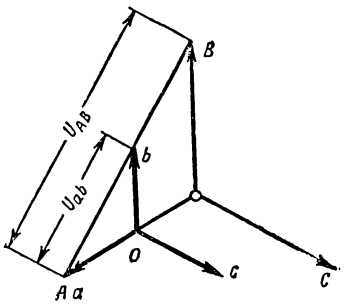


Рис. 9-15. Потенциальная диаграмма при определении группы соединения.

9-6. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

Включение трансформаторов на параллельную работу необходимо для обеспечения бесперебойного снабжения потребителей электрической энергией, а также для возможности вывода трансформаторов в ремонт. Параллельным включением называется такое, когда первичные обмотки приключаются к одним общим шинам, питающим трансформатор, а вторичные к другим общим шинам, распределяющим энергию потребителям. Схема включения двух трансформаторов показана на рис. 9-16.

Для включения и параллельной работы трансформаторов необходимо:

1. Равенство номинальных напряжений трансформаторов, что естественно, так как первичные обмотки приключаются к одним общим шинам, а вторичные — к другим. Различие в коэффициентах трансформации трансформаторов не должно быть более 0,5% их среднего значения.

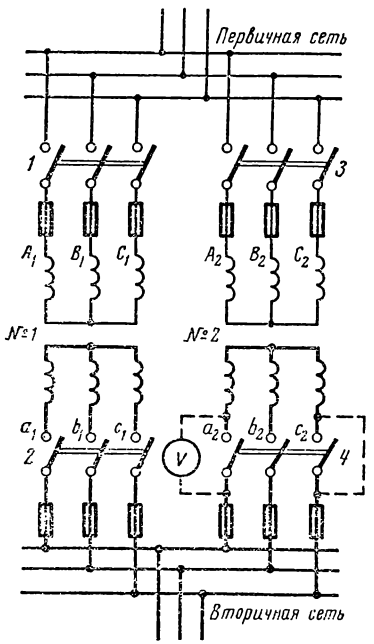


Рис. 9-16. Включение трансформаторов на параллельную работу.

2. Равенство напряжений короткого замыкания $u_{кI} = u_{кII}$, где индексы I и II указывают номер трансформатора. Напряжением короткого замыкания называется такое пониженное напряжение $u_к$, подведенное к одной из обмоток трансформатора при замкнутой накоротко другой, при котором в обмотках устанавливаются номинальные токи. Оно обычно составляет (5—10%) $U_{1н}$. Допускается отклонение величины $u_к$ не более $\pm 10\%$ от среднего значения ее для включаемых трансформаторов.

Это требование объясняется тем, что включаемые параллельно трансформаторы должны будут делить нагрузку между собой пропорционально их номинальным мощностям. Воздействовать на величины э. д. с. трансформаторов нельзя так, как это делается, например, в генераторах постоянного тока. При равенстве напряжений короткого замыкания ($u_{кI} = u_{кII}$) относительные величины падения напряжения при всех нагрузках будут равны, т. е.

$$\left(\frac{I_1 z_1}{U_{1н}}\right)_I + \left(\frac{I_2 z_2}{U_{2н}}\right)_I = \left(\frac{I_1 z_1}{U_{1н}}\right)_{II} + \left(\frac{I_2 z_2}{U_{2н}}\right)_{II},$$

а токи трансформаторов будут пропорциональны номинальным мощностям трансформаторов:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{P_{н1}}{P_{н11}}. \qquad (9\text{-}12)$$

На рис. 9-17 показаны внешние характеристики двух трансформаторов. Если $u_{к1} = u_{к11}$, то при равных номинальных мощностях трансформаторов токи всегда будут равны, так как внешние характеристики совпадают (кривая *1*). Если $u_{к11} > u_{к1}$, то внешняя характеристика второго трансформатора пойдет ниже (кривая *2*) и первый трансформатор перегружается, а второй недогружается ($I_1 > I_{11}$).

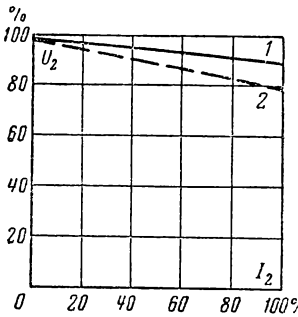


Рис. 9-17. Распределение нагрузки трансформаторами, работающими параллельно.

3. Группы соединения трансформаторов должны быть одинаковы. Если один трансформатор имеет группу 12, а другой 11, то включение невозможно, ибо при совпадении по фазе первичных напряжений U_1 (рис. 9-18) вторичные напряжения U_2 не совпадут.

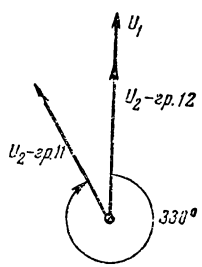


Рис. 9-18. Диаграмма векторов вторичных напряжений при разных группах соединения.

Включение на параллельную работу производится следующим образом (рис. 9-16). Включают рубильники *1* и *2* трансформатора № *1*. Тогда потенциалы нижних зажимов рубильника *4* трансформатора № *2* будут заданы напряжениями вторичной обмотки трансформатора № *1*, т. е. U_{a1}, U_{b1}, U_{c1}. При включении рубильника *3* трансформатора № *2* потенциалы верхних зажимов рубильника *4* определяются напряжениями U_{a2}, U_{b2}, U_{c2}. Включение возможно, если разность потенциалов между точками a_1—a_2, b_1—b_2 и c_1—c_2 рубильника *4* равна нулю. Это проверяется вольтметром, если перемкнуть проводом два соответствующих зажима (например, c_1 и c_2) рубильника *4*. Если при включении вольтметра на зажимы a_1—a_2 и b_1—b_2 разность потенциалов окажется неравной нулю, то вклю-

чение недопустимо по причинам принадлежности трансформаторов к разным группам или приключения несоответствующих зажимов к шинам.

Параллельное включение трансформаторов на подстанциях — ответственная операция и производится при соблюдении специальной инструкции.

9-7. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

На рис. 9-19 показаны два трансформатора, включенные один (№ *1*) в начале питающей линии, а другой (№ *2*) в конце ее. Вследствие падения напряжения в этой линии первичное напряжение трансформатора № *2* может оказаться ниже номинального, а значит и вторичное напряжение будет пониженным. Тогда возникает необходимость регули-

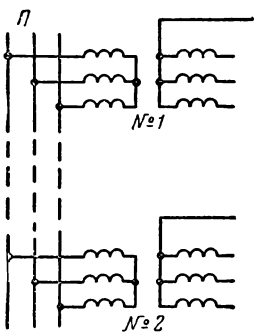


Рис. 9-19. Схема подключения трансформаторов.

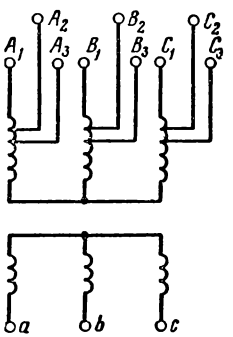


Рис. 9-20. Расположение ответвлений на обмотке трансформатора.

рования первичного напряжения трансформатора № *2*, обычно ($\pm 5\%$) $U_н$.

Для этого на обмотке высшего напряжения делаются ответвления, как показано на рис. 9-20. Ответвления A_2, B_2, C_2 соответствуют номинальному напряжению первичной обмотки. Если первичное напряжение оказывается пониженным, этот трансформатор приключают к линии зажимами A_3, B_3, C_3. При этом коэффициент трансформации уменьшается, а вторичное напряжение возрастает.

Переключение производится специальным переключателем, встроенным в бак трансформатора и имеющим выве-

денную ручку. Вторичная сеть до переключения должна быть отключена. Для регулирования напряжения под нагрузкой применяются специальные устройства.

9-8. МНОГООБМОТОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Многообмоточный трансформатор имеет на магнитопроводе три и более обмотки. На электрических подстанциях часто возникает необходимость трансформировать напряжение 10,5 *кв* на два — 121 и 38,5 *кв*. В этом случае применяется трехобмоточный трансформатор на указанные номинальные напряжения. Естественно, что такой трансформатор выгоднее, чем два отдельных трансформатора на 121/10,5 *кв* и 38,5/10,5 *кв*. Трехобмоточные трехфазные трансформаторы строятся на мощность 5 600 *ква* и до 60 000 *ква*.

Многообмоточные трансформаторы бытового назначения (радиоприемники, телевизоры, магнитофоны и др.) имеют одну первичную обмотку с переключением на напряжение 127 или 220 *в* и несколько вторичных для питания цепей анода, накала, сигнальных и др. на соответствующие напряжения. Мощность таких трансформаторов обычно не превышает 100 *вт*.

9-9. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

А в т о т р а н с ф о р м а т о р о м называется такой трансформатор, у которого обмотка низшего напряжения является частью обмотки высшего напряжения (рис. 9-21). Эта часть выполняется проводом другого сечения или, если разница в токах I_1 и I_2 невелика, одного сечения. При коэффициенте трансформации, близком к единице, автотрансформатор выгоднее трансформатора с двумя обмотками.

Устройство автотрансформатора основано на следующем. Приложенное к обмотке AX первичное напряжение $U_1 = U_{AX}$ равномерно распределяется на все витки обмотки w_1. Таким образом, напряжение на один виток равно $U_1 : w_1$. Вторичное напряжение $U_2 = U_{ax}$ получится умножением напряжения витка на число витков w_2 обмотки ax, т. е.

$$U_2 = \frac{U_1 w_2}{w_1}.$$

Автотрансформатор будет понижающим. Однако, если подвести номинальное напряжение к зажимам ax, то на

зажимах AX получится вторичное напряжение $U_2 > U_1$ и автотрансформатор будет повышающим.

Автотрансформаторы служат для регулирования силы света в театрах, пуска двигателей переменного тока, питания ртутных выпрямителей, в быту и в лабораторной практике.

Автотрансформаторы, позволяющие плавно и в широких пределах регулировать напряжение, называются в а р и а т о р а м и. Схема вариатора показана на рис. 9-21, *в*.

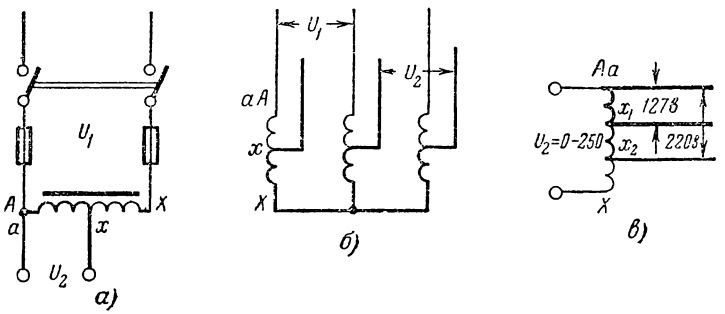


Рис. 9-21. Автотрансформаторы.

а — однофазный; *б* — трехфазный; *в* — вариатор.

Он может подключаться к сети с напряжением 127 и 220 *в*. Зажим *x* представляет контактный ролик, который катится по оголенной от изоляции стороне витков обмотки и позволяет получать вторичное напряжение в пределах от нуля до 1,1 U_1 с интервалами менее одного вольта. В быту автотрансформаторы применяются для перехода от напряжения 127 *в* на 220 *в* и для регулирования напряжения, при питании радиоприемной аппаратуры.

Общий недостаток автотрансформаторов, это электрическая связь между обмотками. При высоком напряжении выбирают $k < 2 - 2{,}5$, так как вторичная цепь должна иметь такую же изоляцию относительно земли, как и первичная.

9-10. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

В цепях высокого напряжения, для безопасности обслуживания измерительных приборов, а также там, где надо расширить их пределы измерений, применяются специальные и з м е р и т е л ь н ы е т р а н с ф о р м а т о р ы.

На рис. 9-22 показана схема включения электроизмерительных приборов с измерительными трансформаторами. Все параллельные измерительные цепи ваттметров, счетчиков, вольтметры и др. включаются на вторичную обмотку трансформатора напряжения *1*, первичная обмотка которого приключена к питающей сети. Трансформатор напряжения работает аналогично си-

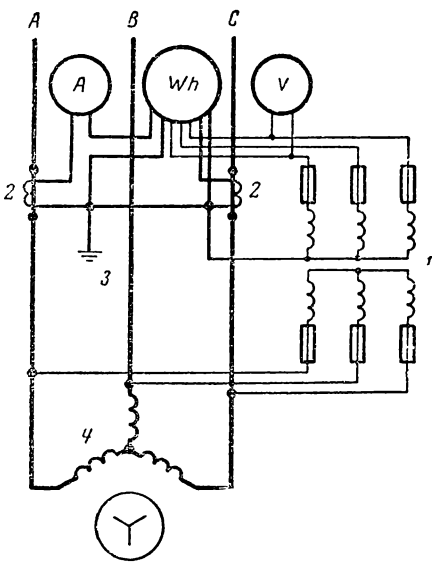


Рис. 9-22. Включение измерительных трансформаторов и приборов.

Рис. 9-23. Измерительный трансформатор напряжения.

ловым трансформаторам, рассмотренным ранее. Вторичная обмотка его рассчитана на 100 *в*. Если трансформатор не перегружать выше его номинальной мощности, то его коэффициент трансформации $k_U = U_1 : U_2 = w_1 : w_2$ остается постоянным. Тогда первичное напряжение

$$U_1 = k_U U_2. \qquad (9\text{-}13)$$

Внешний вид трансформатора напряжения показан на рис. 9-23.

Первичная обмотка трансформатора тока (*1*, рис. 9-24) включается в рассечку линии как амперметр и имеет малое число витков, иногда один-два или часть

шинопровода (рис. 9-24). Вторичная обмотка его (*2*, рис. 9-22, 9-24) имеет большее число витков, рассчитывается на 5 *а* и включается последовательно с обмотками тока ваттметров, счетчиков, амперметрами и др. Как было выяснено ранее [формула (9-8)]:

$$k_1 = \frac{I_1}{I_2} \approx \frac{w_2}{w_1}.$$

Если сопротивление соединительных проводов и подключенных обмоток измерительных приборов не выше допустимой для трансформатора величины, то k = const. Тогда

$$I_1 = k_1 I_2. \qquad (9\text{-}14)$$

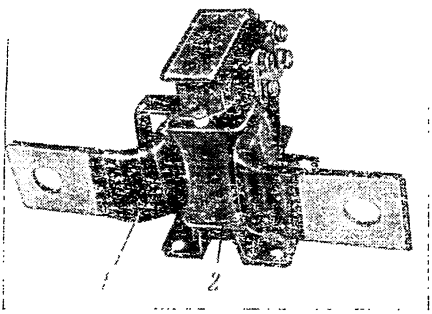


Рис. 9-24. Измерительный трансформатор тока.

На измерительных приборах, предназначенных для постоянной работы с измерительными трансформаторами, что написано на приборах, на шкале показаны значения тока, напряжения, мощности и других величин первичной цепи.

Когда измерительные трансформаторы включаются в цепь высокого напряжения, их вторичные обмотки и корпус заземляются (*3*, рис. 9-22) для безопасности, на случай повреждения изоляции обмоток. Для защиты от коротких замыканий трансформатор напряжения защищается предохранителями. В цепи трансформатора тока, наоборот, предохранители ставить нельзя по следующим причинам. Намагничивающая сила трансформатора F_x ничтожно мала (рис. 9-8), а н. с. первичной обмотки F_1 остается постоянной при неизменном токе первичной цепи и не зависит от н. с. вторичной обмотки F_2. Когда сопротивление вторичной цепи увеличивается, а ток I_2 падает, то F_2 уменьшается, а F_x растет. Если разомкнуть вторичную цепь, то F_2 обращается в нуль, а F_x возрастает до величины F_1. Магнитный поток трансформатора, а с ним и э. д. с. вторичной обмотки E_2 недопустимо возрастают, что вызывает перегрев

сердечника трансформатора, опасность пробоя изоляции обмотки и поражения током обслуживающего персонала.

На рис. 9-25 показаны и з м е р и т е л ь н ы е к л е щ и. Это — трансформатор тока с разъемным сердечником и с амперметром, подключенным к вторичной обмотке. Первичной обмоткой служит провод, ток в котором измеряют.

Рис. 9-25. Измерительные клещи.

9-11. ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ В ТРАНСФОРМАТОРЕ И ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЕ

К трансформатору подается мощность $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$, которая называется п е р в и ч н о й. От трансформатора к потребителю подается мощность $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$, называемая в т о р и ч н о й. При трехфазном токе это будут соответственно мощности: $P_1 = \sqrt{3}\, U_1 I_1 \cos \varphi_1$ и $P_2 = \sqrt{3}\, U_2 I_2 \cos \varphi_2$. Потеря мощности в самом трансформаторе, очевидно, равна $P_1 - P_2$. В трансформаторе нет вращающихся частей и поэтому мощность теряется только на нагрев меди обмоток $P_м$ и стали магнитопровода $P_{ст}$.

Мощность потерь в меди зависит только от токов I_1 и I_2 и равна $P_м = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2$, где r_1 и r_2 — активные сопротивления обмоток. Эти потери легко определяются опытом короткого замыкания трансформатора. Для этого одна из обмоток замыкается накоротко проводом малого сопротивления, а к другой подводится такое пониженное напряжение $U_к$, при котором в обеих обмотках устанавливаются номинальные токи ($I_{1н}$, $I_{2н}$) и из сети потребляется мощность $P_{к.н}$. Как уже известно, это пониженное напряжение называется н а п р я ж е н и е м к о р о т к о г о

замыкания. Оно всегда указано на щитке трансформатора. Сопротивление вторичной цепи должно по возможности быть близким к сопротивлению вторичной обмотки и поэтому амперметр во вторичную цепь не включают.

Так как $U_к$ не превышает (5—10%) $U_{1н}$, то индукция, а следовательно, и потери в стали при коротком замыкании $P_{ст.к.}$ очень малы и ими пренебрегают. Тогда потери в меди

$$P_{к.н} = P_{м.н} + P_{ст.к} \approx P_{м.н}, \qquad (9\text{-}15)$$

где $P_{м.н}$ — потери в меди при номинальных токах.

Потери в стали определяются опытом холостого хода. При постоянной частоте они зависят только от максимального значения магнитной индукции в стали. Если первичное напряжение постоянно, то $B_м = \text{const}$ и потери в стали одинаковы при холостом ходе и при нагрузке. Трансформатор включают под номинальное напряжение $U_{1н}$ при разомкнутой вторичной обмотке (вольтметр снимается). Ток в первичной обмотке $I_х$ очень мал, а ток $I_2 = 0$. Поэтому потерями в меди $P_{м.х}$ при опыте можно пренебречь. Тогда

$$P_х = P_{ст} + P_{м.х} \approx P_{ст}. \qquad (9\text{-}16)$$

Схема включения электроизмерительных приборов показана на рис. 9-6. При опыте холостого хода рубильник p_3, шунтирующий амперметр и последовательную обмотку ваттметра, должен быть замкнут раньше, чем рубильник p_1, так как при включении может наблюдаться бросок тока до величины (6—8) $I_н$. Рубильник p_3 после включения рубильника p_1 размыкают.

Этими опытами определяются потери трансформатора, работающего при номинальных токах $I_{1н}$, $I_{2н}$ и номинальном напряжении $U_{1н}$:

$$P_1 - P_{к.н} = P_{м.н} + P_{ст}. \qquad (9\text{-}17)$$

9-12. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Отношение отданной мощности P_2 к полученной P_1 называют коэффициентом полезного действия η. Для трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{P_2}{P_2 + P_{ст} + P_м} 100\%. \qquad (9\text{-}18)$$

Потери в стали $P_{ст}$ постоянны, а потери в меди пропорциональны квадрату тока или квадрату вторичной мощ-

ности S_2. Пусть $S_2 : S_{2н} = \beta$. Тогда, зная $P_{ст}$ и $P_{м.н}$, можно для любой нагрузки трансформатора подсчитать к. п. д.:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta S_{2н} \cos \varphi_2}{\beta S_{2н} \cos \varphi_2 + P_{ст} + \beta^2 P_{м.н}}. \qquad (9\text{-}19)$$

Зависимость к. п. д. от вторичной мощности, подсчитанная по этой формуле, показана на рис. 9-26.

Как указывалось ранее (§ 9-1), к. п. д. трансформатора очень высок. Максимальное значение к. п. д. наступает при такой нагрузке, при которой потери в меди становятся равными потерям в стали. Эта нагрузка устанавливается расчетом меньшей номинальной по экономическим соображениям. Она легко определяется, если взять приведенные в каталогах для трансформатора данные $P_х = P_{ст}$ и $P_{м.н} = P_{к.н}$. Тогда

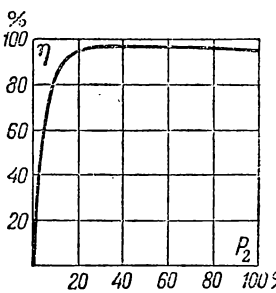


Рис. 9-26. Кривая зависимости к. п. д. трансформатора от вторичной мощности.

$$P_х = \beta^2 P_к \text{ или } \beta = \sqrt{\frac{P_х}{P_к}}. \qquad (9\text{-}20)$$

Пример. Трансформатор мощностью $P_н = 560$ *ква*, напряжением 35 и 10,5 *кв* имеет потери холостого хода при номинальном напряжении 3 350 *вт* и потери короткого замыкания при номинальных токах 9 400 *вт*. Найти ту нагрузку, при которой будет наибольший к. п. д.

$$\beta = \sqrt{\frac{3\,350}{9\,400}} = 0{,}579 \text{ номинальной.}$$

9-13. НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Тепло, выделяющееся в меди и стали при работе трансформатора, повышает его температуру, вызывает старение изоляции и должно отводиться в окружающую среду. Допустимая температура установлена: для обмоток 105° С, для сердечника на поверхности 110° С и для верхних слоев масла 95° С при температуре окружающего воздуха 35° С.

Существуют трансформаторы с воздушным и масляным охлаждением. Мощные трансформаторы, как правило, выполняются с масляным охлаждением. Масло улучшает охлаждение обмоток и защищает изоляцию от вредного дей-

ствия воздуха. Для этого трансформатор помещают в стальной бак с минеральным маслом. Для трансформаторов небольшой мощности (20—30 *ква*) бак делается гладким. Для трансформаторов большей мощности бак делают трубчатым, увеличивая тем самым поверхность охлаждения (рис. 9-27). Выводы обмоток сделаны через проходные изоляторы на

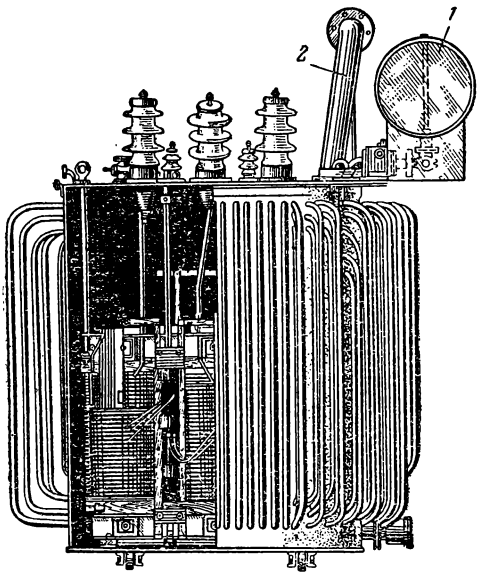


Рис. 9-27. Внешний вид трансформатора с трубчатым баком.

крышке бака. Для трансформаторов очень большой мощности применяются баки с радиаторами.

При мощности, большей 100 *ква*, а для напряжений свыше 6 300 *в* и меньшей мощности бак снабжается маслорасширителем (*1*, рис. 9-27). Это резервуар, соединенный трубой с баком. Уровень масла в расширителе повышается при нагреве трансформатора и падает при охлаждении его. Емкость его такая, что при всех нагрузках и колебаниях температуры окружающего воздуха от —35° до +35° С в нем есть масло. Контролируется уровень маслоуказателем. Маслорасширитель, уменьшая поверхность соприкосновения масла с воздухом, обеспечивает меньшее загрязнение и увлажнение масла. Трансформаторы при $S \geqslant$

$\geqslant 1\,000$ *ква* снабжаются еще выхлопной трубой *2*. Это стальная труба, соединенная с баком и закрытая сверху стеклянной мембраной. При аварийном состоянии трансформатора образующиеся при испарении масла газы выдавливают мембрану и выходят из бака, предохраняя его от разрыва.

9-14. ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСВАРКИ

Трансформаторы для электросварки представляют собой специальные аппараты и применяются не только для сварки, но и для резки и наплавки электрической дугой. Они работают в прерывистом режиме при полном цикле работы (сварка + пауза) 5 *мин* и продолжительности сварки $ПР = 60—100\%$. Они удовлетворяют следующим условиям: напряжение на вторичных зажимах легко возбуждает дугу и безопасно для человека, при нагрузке напряжение изменяется так, что сварочный ток остается почти постоянным (внешняя характеристика должна быть крутой, см. § 8-21), при коротких замыканиях ток не превышает рабочий более чем на 20—40%, сварочный ток легко регулируется. Трансформаторы выполняются однофазными, сухими, с естественным воздушным охлаждением.

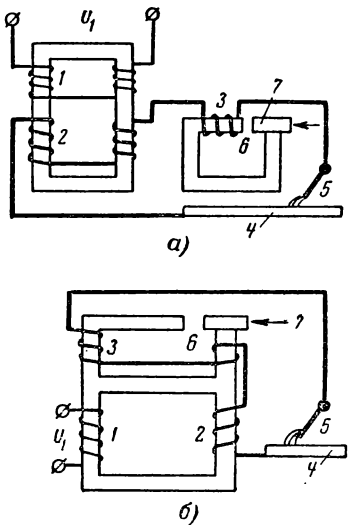


Рис. 9-28. Трансформатор для сварки электрической дугой.

Одна из форм исполнения показана на рис. 9-28,*а*. Первичная обмотка *1* рассчитана на $U_1 = 220$ или 380 *в*, а по требованию на 500 *в*. Вторичная обмотка *2*, соединенная последовательно с отдельной реактивной катушкой *3*, имеет при холостом ходе $U_{2x} = 70$ *в* и при нагрузке $U_2 = 30$ *в*. Сварочный ток между свариваемым изделием *4* и электродом *5* регулируется изменением воздушного зазора *6* катушки *3*. В однокорпусном исполнении (рис. 9-28,*б*) реактивная катушка *3* и вторичная обмотка *2* связаны

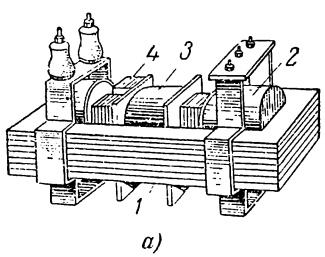
магнитно, на общем магнитопроводе. Подвижная часть магнитопровода *7* в обоих исполнениях может перемещаться специальной рукояткой.

По назначению трансформаторы различают: для ручной сварки, автоматической под флюсом, электрошлаковой и для сварки в защитных газах. По току они делятся: для токов до 100—150 *а*, до 350—380 *а* и до 2 000—2 500 *а*. Коэффициент полезного действия трансформаторов составляет 83—90%, а $\cos \varphi = 0{,}52 \div 0{,}62$.

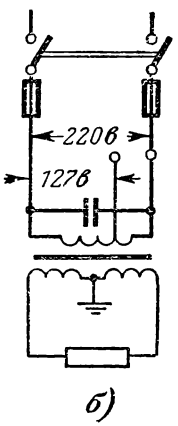
9-15. ГАЗОСВЕТНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Газосветные трансформаторы применяются в схемах автоматики зажигания котельных установок, для питания газосветных трубок тлеющего разряда, рекламных установок и надписей световой сигнализации.

Внешний вид трансформатора без кожуха (*а*) и схема его соединений (*б*) показаны на рис. 9-29. Магнитопровод *1* шихтованный,



а)



б)

Рис. 9-29. Газосветный трансформатор.

прямоугольной формы; обмотка высшего напряжения *2* бескаркасная, состоит из двух катушек и заземлена присоединением к магнитопроводу; ее напряжение при холостом ходе трансформатора 10 *кв*, а при нагрузке 6 *кв*. Обмотка низшего напряжения (первичная) *3* намотана на каркасе и состоит из двух частей на напряжение 127 и 220 *в*. Трансформатор имеет круто падающую внешнюю характеристику и работает в режиме, близком к короткому замыканию. Ограничение тока короткого замыкания достигается магнитными шунтами *4*, увеличивающими маг-

нитное рассеяние трансформатора. Шунты представляют собой четыре пакета стали, закладываемые в окнах магнитопровода. Конденсатор *5* предназначен для увеличения коэффициента мощности.

9-16. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ОДНОФАЗНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

Перед выполнением работы ознакомиться с содержанием § 9-3, 9-4, 9-11, 9-12.

Описание работы

Включение трансформатора производится по схеме на рис. 9-6. При опыте холостого трансформатора рубильник p_2 отключают, замыкают рубильник p_1 и измеряют I_{1x}, P_{1x} и U_{2x}. Перед включением рубильника p_1 токовую цепь амперметра и ваттметра шунтируют проводом малого сопротивления, как показано пунктиром на рис. 9-6. После включения цепи размыкают рубильник p_3 и производят измерения. Напряжение U_{1x} должно быть равно указанному на щитке трансформатора, т. е. $U_{1н}$. При измерении мощности P_{1x} вольтметр во вторичной цепи должен быть отключен.

При опыте короткого замыкания зажимы вторичной обмотки *ax* замыкают накоротко проводом малого сопротивления, а к первичной обмотке *AX* подводят пониженное напряжение с таким расчетом, чтобы ток в первичной обмотке был равен номинальному ($I_1 = I_{1н}$).

План работы

1. Ознакомиться с трансформатором и записать основные технические данные трансформатора и измерительных приборов. Собрать схему (рис. 9-6) и показать ее преподавателю.

2. Включить трансформатор вхолостую и измерить первичное и вторичное напряжения U_{1x} и U_{2x}. Измерить мощность холостого хода P_x и ток холостого хода I_{1x}. Подсчитать коэффициент трансформации, потери в стали и отношение $\frac{I_{1x}}{I_{1н}}$ 100%.

3. Произвести опыт короткого замыкания и измерить: напряжение при коротком замыкании $U_{1к}$, мощность короткого замыкания $P_к$ и ток в первичной обмотке $I_1 = I_{1н}$.

4. Подсчитать $U_к = \frac{U_{1к}}{U_{1н}}$, к. п. д. трансформатора при номинальном токе $I_1 = I_{1н}$ и при а) $\cos \varphi_2 = 1$; б) $\cos \varphi_2 = 0{,}8$.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

10-1. НАЗНАЧЕНИЕ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Система трехфазного переменного тока, позволившая создать устройства для получения вращающегося магнитного потока, вызвала появление наиболее распространен-

ного в данное время электродвигателя, называемого а с и н х р о н н ы м. Это название обусловлено тем, что вращающаяся часть машины — р о т о р всегда вращается со скоростью, не равной скорости магнитного потока, т. е. не синхронно с ним. Изготовляемый на мощности от долей ватта до тысяч киловатт при напряжениях 127, 220, 380, 500, 600, 3 000, 6 000 и 10 000 *в* этот электродвигатель прост по конструкции, надежен в эксплуатации и дешев по сравнению с другими электродвигателями. Он применяется во всех видах работ, где не требуется поддержания постоянной скорости вращения, а также в быту, в однофазном исполнении при малой мощности. В изобретенном в 1889 г. М. О. Доливо-Добровольским трехфазном асинхронном электродвигателе использовано открытое им трехфазное вращающееся магнитное поле. Кроме того, им созданы трехфазный генератор, трехфазный трансформатор и выполнена первая в мире передача электрической энергии при помощи трехфазного тока, неотъемлемыми звеньями которой и явились перечисленные выше генератор — двигатель — трансформатор.

10-2. ПОЛУЧЕНИЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА

При рассмотрении трехфазных трансформаторов было показано, что сумма мгновенных значений пульсирующих

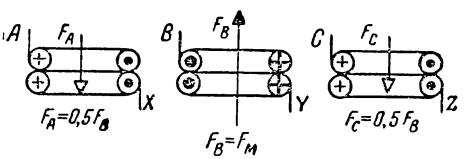


Рис. 10-1. Суммирование мгновенных значений магнитных потоков трехфазного трансформатора.

(переменных) магнитных потоков трех стержней всегда равна нулю (§ 9-5). Происходит это потому, что оси трех обмоток AX, BY, CZ параллельны друг другу, как показано на рис. 10-1. Направление мгновенных токов нанесено для момента времени *а* диаграммы трехфазного тока

(рис. 10-2). Такой же эффект получается, если обмотки расположены по одной, общей оси (рис. 10-3).

Однако дело существенно меняется, если обмотки расположены в пространстве под углом 120 *эл. град*, так же как и оси. Такое размещение обмоток на внутренней поверхности стального цилиндра показано на рис. 10-4. Токи в проводах обмотки нанесены для момента времени *а* диаграммы на рис. 10-2 и соответствуют показанным на рис. 10-3.

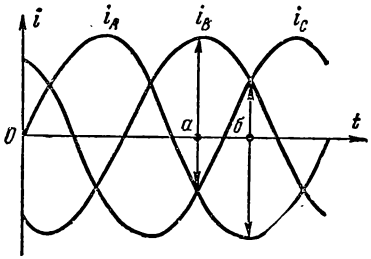


Рис. 10-2. Кривые трехфазного тока.

Намагничивающая сила обмотки $BY - F_{Bм}$ направлена по оси обмотки *by* и имеет максимальное значение, так как $i_B = I_{Bм}$. Намагничивающая сила обмотки $AX - F_A$ направлена по оси своей обмотки *ax*, но равна $0{,}5\,F_{Bм}$, так как ток $i_A = 0{,}5\,I_{Bм}$. Точно так же $F_C = 0{,}5\,F_{Bм}$ и направлена по оси *cx*. Легко видеть, что обмотки при данном расположении создают суммарную н. с.:

$$F = F_A + F_C + F_{Bм} = 1{,}5F_{Bм}.$$

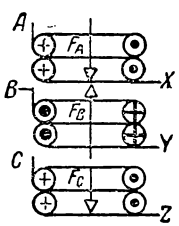


Рис. 10-3. Суммирование магнитных потоков трех обмоток, расположенных на одной оси.

Если рассмотреть явление через $^1/_6$ периода (точка *б* рис. 10-2), то можно видеть (рис. 10-5), что результирующая н. с., сохранив свое значение, повернулась на $^1/_6$ окружности, т. е. на 60°.

Вместе с н. с. трехфазной обмотки вращается и суммарный магнитный поток Ф, созданный ею. При данной конструкции обмоток поток оказался двухполюсным ($p = 1$), что и показано на рис. 10-5.

Легко видеть, что за один период тока магнитный поток сделает один оборот, а за f периодов в секунду или за $f \cdot 60$ периодов в минуту двухполюсный поток сделает:

$$n = \frac{f \cdot 60}{p}\ об/мин.$$

Если сконструировать обмотки так, чтобы число пар полюсов было больше единицы ($p = 2, 3, 4...$), то скорость

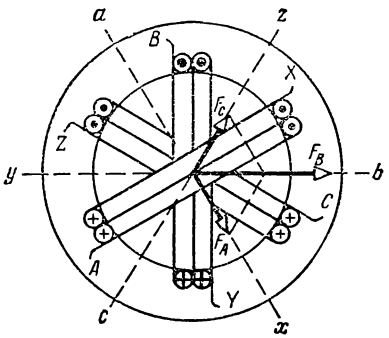


Рис. 10-4. Суммарный магнитный поток трехфазной обмотки асинхронного двигателя.

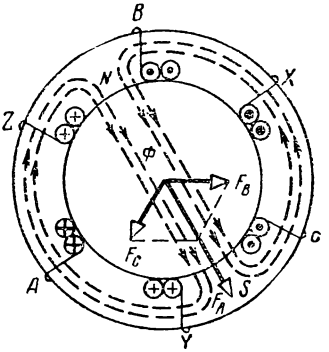


Рис. 10-5. Суммарный магнитный поток двигателя для момента времени *б* (рис. 10-2).

вращения магнитного потока уменьшается во столько раз, во сколько $p > 1$.

Итак, трехфазный ток, обтекая трехфазную обмотку, создает вращающийся с постоянной скоростью магнитный поток, сохраняющий свою амплитуду в $1^1/_2$ раза большую амплитуды потока одной фазы

$$\Phi = 1{,}5\Phi_{\text{фазы}}. \qquad (10\text{-}1)$$

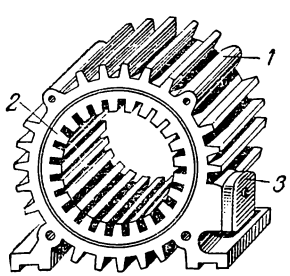


Рис. 10-6. Статор асинхронного двигателя без обмотки.

В асинхронных электродвигателях трехфазная обмотка располагается в пазах внутренней цилиндрической поверхности неподвижной части машины — с т а т о р а (рис. 10-6). Статор состоит из внешнего стального корпуса *1*, в который запрессован стальной с е р д е ч н и к статора *2*, имеющий пазы. Сердечник собирается из стальных штампованных листов (рис. 10-7), изолированных друг от друга с обеих сторон специальным лаком. Корпус статора у показанного электродвигателя с внешней стороны обдувается воздухом при помощи вентилятора, и для увеличения охлаждаемой поверхности она выполнена ребристой.

Так как внутри статора должна помещаться вращающаяся часть — р о т о р, то лобовые части обмотки, не лежащие в пазах, должны укладываться не так, как показано на рис. 10-4, а на торцовых сторонах сердечника ста-

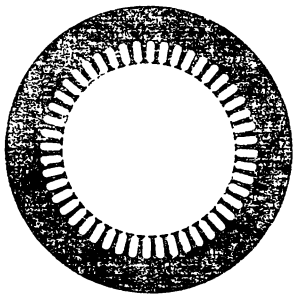


Рис. 10-7. Стальной лист статора.

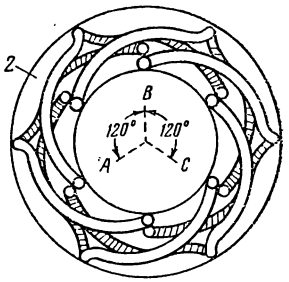


Рис. 10-8. Расположение обмотки статора в пазах.

тора *2* (рис. 10-8). Кроме того, активные части секций располагаются в пазах не рядом, как на рис. 10-4, а в два слоя (верхний и нижний), подобно обмоткам якоря машины постоянного тока (рис. 8-9). Начала фаз *A*, *B*, *C* смещены в пространстве одно за другим на 120 *эл. град* (рис. 10-8), а выводы от них помещены в распределительную коробку *3* (рис. 10-6).

10-3. ОБМОТКА СТАТОРА

Обмотка статора состоит из отдельных секций, как и у машин постоянного тока. В обмотке якоря машины постоянного тока число витков секции стремятся сделать по возможности небольшим. Причина этого в том, что секция якоря при коммутации размыкается и замыкается и в ней возбуждается нежелательная э. д. с. самоиндукции, тем большая, чем больше число витков.

Статор асинхронного двигателя не имеет коллектора, размыканий секций при работе не происходит и их число витков можно брать значительным, что особенно важно для получения большой э. д. с. обмотки.

На рис. 10-9 показана секция обмотки статора, имеющая четыре витка. Однако, если число витков секций велико, то паз получается большим, а поверхность сердечника между пазами оказывается неиспользованной

(рис. 10-4, 10-5, 10-8). Поэтому предпочитают делить секции на части, например, как это показано на рис. 10-10. Тогда получается к а т у ш к а, состоящая из нескольких последовательно соединенных секций, уложенных каждая в свою пару пазов. Благодаря этому число пазов увеличивается, величина паза уменьшается, а сталь сердечника используется лучше (рис. 10-6).

Все активные стороны секций укладываются в пазах в два слоя; нижний слой на рис. 10-10 показан пунктиром, верхний — сплошной линией. Расположение верхнего и нижнего слоев, а также лобовых частей видно на рис. 10-8.

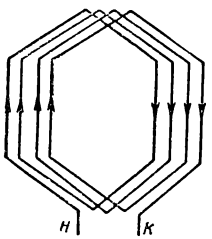


Рис. 10-9. Секция обмотки статора.

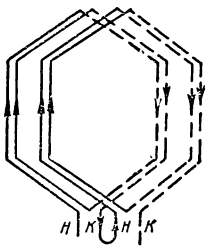


Рис. 10-10. Соединение двух секций обмотки статора.

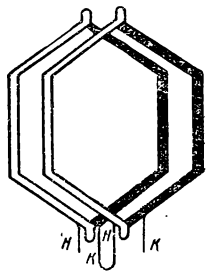


Рис. 10-11. Обозначение секций.

Все провода секций изолируются вместе и в дальнейшем секция будет изображаться одновитковой, независимо от числа ее витков (рис. 10-11).

При постоянной частоте тока, проходящего в обмотке, скорость вращения магнитного потока зависит только от того числа пар полюсов, на которое построена обмотка статора. Так, при $f = 50$ *гц* и при $p = 1, 2, 3, 4$ и т. д. скорость вращения потока будет соответственно $n_1 = 3\,000$, 1 500, 1 000, 750 *об/мин* и т. д. Кроме того, при заданном p на каждый полюс от каждой фазы должно, очевидно, приходиться некоторое число пазов. Тогда все число пазов статора должно быть равно:

$$z = 2pmq, \qquad (10\text{-}2)$$

где $2p$ — число полюсов или полюсных делений (полюсное деление τ — расстояние между серединами двух разноименных, рядом лежащих полюсов всегда равное 180 *эл. град*);

m — число фаз обмотки;

q — число пазов на полюс и фазу, т. е. число пазов, занятых каждой фазой на каждом полюсном делении.

Пусть $2p = 2$, $m = 3$, $q = 2$. Число пазов статора согласно формуле (10-2) получается 12. В каждом пазу находятся две активные стороны секции и, следовательно, число секций тоже 12. Так как обмотка трехфазная, то каждая фаза состоит из четырех секций, образующих две

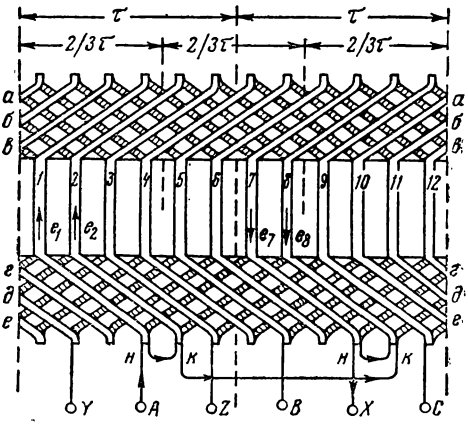


Рис. 10-12. Развертка двухслойной обмотки статора.

катушки, имеющие каждая по две секции, соединенные последовательно (рис. 10-11). Обмотка, как обычно принято, изображена на рис. 10-12 в развернутом виде, так как дисковое изображение (рис. 10-8), даже для простейших схем, чертить затруднительно.

На развертке окружности (рис. 10-12) показаны зоны двухполюсных делений τ. На каждом полюсном делении каждая фаза занимает два паза, т. е. $q = 2$, поэтому легко разметить пазы, принадлежащие отдельным фазам. Если произвольно принять, что пазы *1*, *2* принадлежат фазе *A*, то следующие два паза этой же фазы могут быть только на втором полюсном делении, т. е. сдвинуты на 180 *эл.град*. Это будут пазы *7*, *8*. Разметка делается по верхнему слою активных сторон секций.

Так как э. д. с. секций *1*, *2* и *7*, *8*, соединенных в катушки, должны складываться, то соединение сделано так, как

показано на рис. 10-10 и 10-11. Теперь эти две катушки должны быть соединены в обмотку фазы *A*. Однако катушки размещены на разных полюсных делениях, и, следовательно, их э. д. с. сдвинуты по фазе на 180°. Таким образом, чтобы получить э. д. с. фазы

$$e_A = e_1 + e_2 + (-e_7 - e_8),$$

надо конец катушки *1—2* соединить с концом катушки *7—8*, что и сделано на рис. 10-12. Если принять за начало фазы *A* провод, выходящий из паза *1*, то концом фазы *X* будет провод, выходящий из паза *7*.

Начало фазы *B* будет в пазу *5*, т. е. сдвинутым относительно начала фазы *A* на $^2/_3\ \tau$, или 120 *эл.град*. Фазе *BY* принадлежат пазы *5*, *6* и *11—12*. Начало фазы *C* располагается в пазу *9*, т. е. со сдвигом еще на 2/3 τ. Фазе *CZ* принадлежат пазы *9*, *10* и *3*, *4*. Соединения второй и третьей фаз на рис. 10-12 не показаны, а размечены только начала *B*, *C* и концы *Y*, *Z*. Для присоединения к питающей сети обмотки статора соединяются, как и у трансформатора, в звезду или в треугольник.

10-4. ОБМОТКИ РОТОРА

Вращающаяся часть асинхронного двигателя — р о т о р также имеет обмотку. Она помещена в пазах *1* стального цилиндра (рис. 10-13), набранного, как и сердечник статора, из стальных листов (рис. 10-14). Обмотка может быть фазной, построенной по тому же принципу, что и обмотка статора. Делается это в том случае, когда в фазы

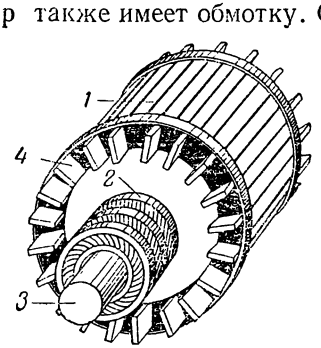


Рис. 10-13. Обмотка ротора асинхронного двигателя.

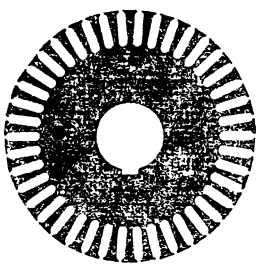


Рис. 10-14. Стальной лист ротора.

обмотки включается добавочное сопротивление (реостат), необходимый при пуске или для регулирования скорости двигателя. Обмотка соединяется в звезду, а выводы подключаются к трем контактным кольцам *2* (рис. 10-13), насажен-

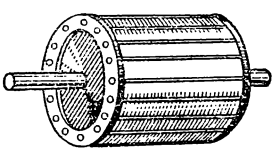


Рис. 10-15. Ротор короткозамкнутого двигателя.

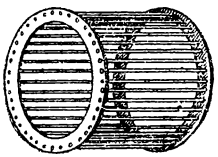


Рис. 10-16. Беличье колесо.

ным на вал *3* ротора и изолированным от вала и друг от друга. На торцах цилиндра крепятся лопасти вентиляторов *4* для охлаждения двигателя. Такой двигатель называется двигателем с фазным ротором или с кольцами.

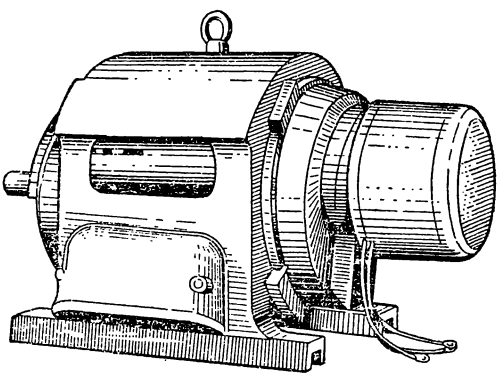


Рис. 10-17. Трехфазный асинхронный двигатель с кольцами.

Чаще выполняются короткозамкнутые двигатели, у которых в пазах стального цилиндра помещаются медные стержни, замыкаемые накоротко медными кольцами на торцах (рис. 10-15). Обмотка образует клетку, показанную отдельно на рис. 10-16. Для двигателей до 100 *квт* эта обмотка выполняется заливкой пазов алюминием. При

этом одновременно отливаются торцовые кольца и лопасти вентилятора для охлаждения двигателя, подобно показан-

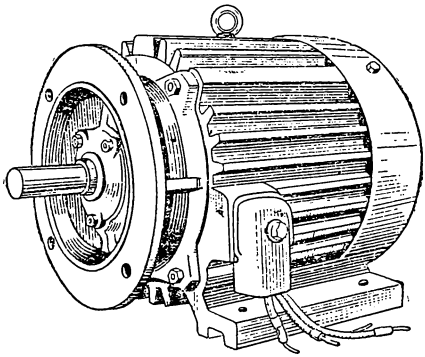


Рис. 10-18. Трехфазный асинхронный короткозамкнутый двигатель.

ным на рис. 10-13. Вид двигателя с кольцами и короткозамкнутого с внешним обдувом для охлаждения показан на рис. 10-17 и 10-18.

10-5. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Под влиянием подведенного к статору напряжения сети U_1 (рис. 10-19) в его обмотке протекает ток I_1, мгновенное направление которого показано соответственно моменту *а* (рис. 10-2). Этот ток создает вращающийся магнитный поток Ф, замыкающийся через статор и ротор. Поток создает в обеих обмотках э. д. с. E_1 и E_2, как в первичной и вторичной обмотках трансформатора. Таким образом, асинхронный двигатель подобен трехфазному трансформатору, в котором э. д. с. создаются вращающимся магнитным потоком.

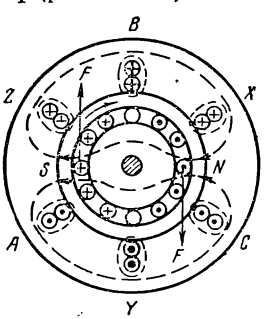


Рис. 10-19. Работа асинхронного двигателя при $\cos \Psi_2 = 1$.

Пусть поток вращается в направлении движения стрелки часов. Под влиянием э. д. с. E_2 в обмотке ротора пойдет ток I_2, направление которого показано на рис. 10-19 в предположении, что он совпадает по фазе с E_2.

Взаимодействие тока I_2 и потока Ф создает электромагнитные силы F, приводящие ротор во вращение, вслед за вращающимся потоком. Таким образом, асинхронный двигатель представляет собой трансформатор с вращающейся вторичной обмоткой и способный поэтому превращать электрическую мощность $E_2 I_2 \cos \Psi_2$ в механическую.

Ротор всегда отстает от вращающегося магнитного потока, так как только в этом случае может возникать э. д. с. E_2, а следовательно, ток I_2 и силы F. Чтобы изменить направление вращения ротора, следует изменить направление вращения потока. Для этого меняют местами два любых провода, подводящих ток от сети к статору. В этом случае меняется порядок следования фаз ABC на ACB или BAC и поток вращается в обратную сторону.

10-6. СКОЛЬЖЕНИЕ РОТОРА

Выше говорилось, что ротор асинхронного двигателя всегда должен отставать от вращающегося магнитного потока. Скорость вращения потока принято означать n_1, она постоянна, так как $p = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$. Скорость вращения ротора можно обозначить n_2. Величина

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad \text{или} \quad s\% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100\%, \qquad (10\text{-}3)$$

называется с к о л ь ж е н и е м.

Теоретически скольжение меняется от 1 до 0 или от 100% до 0, так как при неподвижном роторе в первый момент пуска $n_2 = 0$, а если вообразить, что ротор вращается синхронно с потоком, $n_2 = n_1$.

Чем больше нагрузка на валу, тем меньше скорость ротора n_2 и значит больше s, так как бóльший тормозной момент должен уравновеситься бóльшим вращающим моментом; последнее возможно только при увеличении E_2 и I_2, а значит и s. Скольжение при номинальной нагрузке $s_н$ у асинхронных двигателей равно от 1 до 6%; меньшая цифра относится к мощным двигателям.

10-7. ЧАСТОТА Э.Д.С. И ТОКА В ОБМОТКЕ РОТОРА

Магнитный поток вращается со скоростью n_1, ротор — со скоростью n_2. Частота э. д. с. и тока в роторе, очевидно, пропорциональна скорости вращения потока относительно

ротора, т. е. величине $n_1 - n_2$. Тогда

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} = \frac{pn_1 s}{60} = f_1 s. \qquad (10\text{-}4)$$

При неподвижном роторе $f_2 = f_1 \cdot 1 = f_1$; если ротор вращается синхронно, то $f_2 = f_1 \cdot 0 = 0$. При номинальной скорости вращения, т. е. при $s_н \approx 2$—4%, частота f_2 очень мала: $f_2 = f_1 s = 50 \cdot 0{,}02 \div 50 \cdot 0{,}04$, т. е. 1—2 *гц*.

10-8. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИЕ СИЛЫ ОБМОТОК СТАТОРА И РОТОРА

Если ротор неподвижен, то в обмотках статора и ротора, как в первичной и вторичной обмотках трансформатора, наводятся э. д. с.:

$$E_1 = 4{,}44 f_1 w_1 \Phi_м k_1; \qquad (10\text{-}5)$$

$$E_2 = 4{,}44 f_1 w_2 \Phi_м k_2. \qquad (10\text{-}6)$$

Отличие только в том, что коэффициентами k_1 и k_2 приходится учитывать особенности обмоток, распределенных по цилиндрической поверхности. При вращении ротора его э. д. с. все время меняется, так как $f_2 = f_1 s$. Тогда э. д. с. вращающегося ротора

$$E_{2s} = 4{,}44 f_2 w_2 \Phi_м k_2. \qquad (10\text{-}7)$$

Эту э. д. с. принято выражать через э. д. с. неподвижного ротора

$$\frac{E_{2s}}{E_2} = \frac{f_2}{f_1} = \frac{f_1 s}{f_1} = s$$

или

$$E_{2s} = E_2 s. \qquad (10\text{-}8)$$

Следовательно, э. д. с. ротора сильно меняется в процессе работы двигателя. При $s = 1$, $E_{2s} = E_2$, а при $s = 0$, $E_2 s = 0$.

10-9. СОПРОТИВЛЕНИЯ В ОБМОТКЕ РОТОРА

Как и в трансформаторе, часть потока статора замыкается по путям рассеяния, т. е. вокруг проводов статора, не заходя в ротор (рис. 10-19). Известно, что эти потоки обусловливают реактивное (индуктивное) сопротивление обмотки x_1. Такие же потоки рассеяния существуют и вокруг проводов обмотки ротора, когда в ней протекает ток. Ими обусловлено реактивное сопротивление ротора x_2.

При неподвижном роторе

$$x_2 = \omega_1 L_2 = 2\pi f_1 L_2.$$

При вращающемся роторе

$$x_{2s} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 s L_2.$$

Тогда

$$\frac{x_{2s}}{x_2} = \frac{f_1 s}{f_1} = s$$

или

$$x_{2s} = x_2 s. \tag{10-9}$$

Отсюда следует, что реактивное сопротивление ротора непрерывно и сильно меняется при работе двигателя, от величины $x_{2s} = x_2 \cdot 1 = x_2$ при неподвижном роторе до величины $x_{2s} = x_2 \cdot 0 = 0$, если бы ротор вращался синхронно.

В двигателях нормального исполнения изменением активного сопротивления ротора при изменении частоты от 50 *гц* до 0 можно пренебречь и считать $r_2 = \text{const}$.

10-10. ТОК В ОБМОТКЕ РОТОРА

Из сказанного выше об изменении э. д. с. и реактивного сопротивления обмотки ротора можно заключить, что ток в роторе

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}} \tag{10-10}$$

тоже меняется при изменении скорости вращения. Пусковой ток $I_{2п}$ должен быть велик и отставать от э. д. с. на большой угол Ψ_2, так как E_2 велика, а реактивное сопротивление обмотки x_2 обычно в 8—10 раз больше активного r_2. При вращении ротора уменьшаются E_{2s} и x_{2s}. Вследствие этого уменьшаются ток I_2 и угол Ψ_2. Указанное обстоятельство очень важно, так как в этом существенная разница между трансформатором и асинхронным двигателем.

10-11. РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Трехфазный ток I_1, протекая в трехфазной обмотке статора, создает н. с. F_1, вращающуюся со скоростью $n_1 = \frac{f_1 \cdot 60}{p}$ (рис. 10-4, 10-5). Трехфазный ток ротора I_2 создает в трехфазной обмотке ротора н. с. F_2, вращающуюся вокруг ротора со скоростью $n_3 = \frac{f_2 \cdot 60}{p}$. Сам ротор вращается в сто-

рону н. с. со скоростью n_2. Тогда скорость вращения н. с. F_2 относительно статора равна:

$$n_2 + n_3 = n_2 + \frac{f_2 \cdot 60}{p} = n_2 + \frac{f_1 s \cdot 60}{p} =$$

$$= n_2 + n_1 s = n_2 + n_1 \frac{n_1 - n_2}{n_1} = n_1.$$

Таким образом, обе н. с. F_1 и F_2 вращаются с одной скоростью n_1, друг относительно друга неподвижны и создают сообща вращающийся магнитный поток Ф. Следовательно, все приведенное в § 9-4 и на рис. 9-8 и 9-9 справедливо и для асинхронного двигателя.

Следует отметить, что благодаря воздушному зазору между ротором и статором ток холостого хода (рис. 9-7) двигателя очень велик (20—40)% $I_{1н}$. Поэтому для улучшения $\cos \varphi_1$ сети двигатель необходимо нагружать полностью.

10-12. ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ ДВИГАТЕЛЯ

В двигателях постоянного тока вращающий момент определяется выражением $M \equiv \Phi I_я$, т. е. он пропорционален потоку и току якоря. В асинхронном двигателе момент создается вращающимся потоком Ф и током ротора I_2. Он может быть выражен

$$M \equiv \Phi I_2 \cos \Psi_2. \qquad (10\text{-}11)$$

Следовательно, момент пропорционален потоку и активной слагающей тока ротора $I_2 \cos \Psi_2$, так как только активная слагающая тока определяет мощность, а значит и момент.

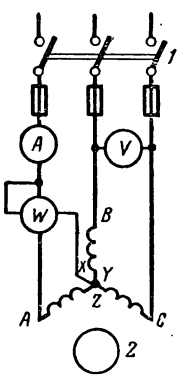


Рис. 10-20. Схема включения короткозамкнутого асинхронного двигателя.

На рис. 10-20 представлена схема включения короткозамкнутого двигателя. Если пустить двигатель, включив рубильник *1*, то в первый момент пуска, когда $n_2 = 0$, а $s = 1$, наведенная в роторе *2* э. д. с. E_2 и пусковой ток $I_{2п}$ максимальны. Однако, пусковой момент $M_п$ не будет максимальным, а в 2—2,5 раза меньше максимального.

Векторная диаграмма для цепи ротора (рис. 10-21), построенная подобно изображенной на рис. 9-9, показывает

причину этого. Обычно в роторе x_2 во много раз больше r_2 и угол Ψ_2, на который ток $I_{2п}$ отстает от э. д. с. E_2, велик. Поэтому активная слагающая тока $I_{2п}\cos\Psi_2$, а значит и пусковой момент $M_п$ малы. В современных асинхронных двигателях $\frac{M_п}{M_н}=1-1{,}5$, хотя $\frac{I_{2п}}{I_н}\approx 4{,}5-6{,}5$.

Это же явление по другому объясняется на рис. 10-19 и 10-22. При описании принципа работы двигателя (рис. 10-19) было предположено, что ток I_2 совпадает по фазе с

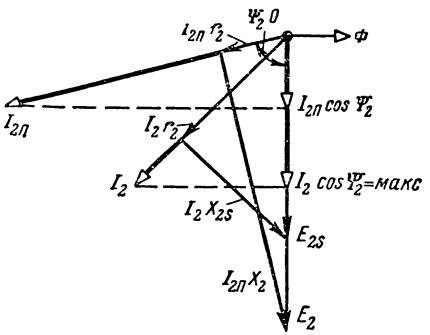


Рис. 10-21. Векторная диаграмма в цепи ротора.

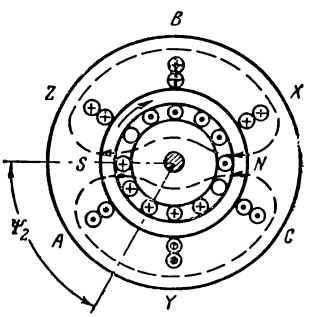


Рис. 10-22. Ток в роторе двигателя в момент пуска.

э. д. с. E_2, т. е. что он активный ($\Psi_2=0$). На рис. 10-22 представлен момент пуска, когда направление э. д. с. в проводах ротора соответствует обозначенному на рис. 10-19, а ток показан отстающим от э. д. с. на угол Ψ_2. Тогда шесть проводов ротора (три под полюсом N и три под полюсом S) создают усилия, действующие в направлении вращения потока, а два провода вызывают противодействующие усилия. В результате этого вращающий момент будет тем меньше, чем больше сдвиг фаз между током I_2 и э. д. с E_2.

По мере увеличения скорости вращения ротора реактивное сопротивление обмотки ротора $x_{2s}=x_2s$ уменьшается, а вместе с этим уменьшается угол Ψ_2, так как сопротивление $r_2\approx$ const. Наступает такое положение (рис. 10-21), когда при некотором скольжении $s_м\approx 0{,}1$—$0{,}15$ реактивное сопротивление x_2s становится равным активному r_2, угол $\Psi=45°$ и э. д. с. E_{2s} уравновешивает два равных падения

напряжения $I_2 r_2$ и $I_2 x_{2s}$. В это время активная слагающая тока I_2 cos Ψ_2 и вращающий момент $M_м$ становятся максимальными, несмотря на некоторое уменьшение тока I_2. Обычно $\frac{M_м}{M_н} = 1{,}8—2{,}5$ и называется способностью к перегрузке.

При дальнейшем разгоне ротора x_{2s} становится значительно меньшим, чем r_2, им можно пренебречь и считать ток ротора активным ($I_2 \approx I_2 \cos \Psi_2$). Так как $E_{2s} = E_2 s$ тоже продолжает уменьшаться, то вместе с током I_2 уменьшается и вращающий момент. Максимальная скорость вращения будет при холостом ходе двигателя и тогда $n_2 \approx n_1$, а $s \approx 0$. Зависимость вращающего момента от скольжения $M = f(s)$ представлена на рис. 10-23.

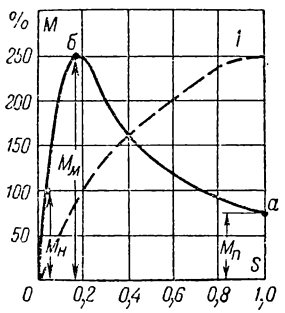


Рис. 10-23. Зависимость вращающего момента двигателя от скольжения.

Нормальная работа двигателя возможна только на участке кривой при скольжениях s от нуля до $s_м$, так как в этом случае при увеличении тормозного момента и значит s вращающий момент возрастает. На участке от $s = s_м$ до $s = 1$ работа двигателя неустойчива. Номинальный момент $M_н$ соответствует обычно номинальному скольжению $s_н = 1—6\%$.

Как было показано раньше (§ 9-4), поток Ф пропорционален напряжению U_1, подводимому к трансформатору. Сказанное остается в силе и для асинхронного двигателя. Так как $M \equiv \Phi I_2 \cos \Psi_2$, то можно написать, что

$$I_2 \cos \Psi_2 \equiv E_{2s} \equiv \Phi \equiv U_1.$$

Отсюда можно сделать очень важный для асинхронных двигателей вывод

$$M \equiv U_1 U_1 \equiv U_1^2, \qquad (10\text{-}12)$$

т. е. вращающий момент пропорционален квадрату подведенного к статору напряжения. Таким образом, падение напряжения в сети, например до 0,9 $U_{1н}$, вызовет уменьшение момента до $0{,}9 \cdot 0{,}9\ M_н = 0{,}81\ M_н$ и нагруженный двига-

тель может остановиться. Указанным обстоятельством и объясняется, частично, нормированное падение напряжения в распределительных сетях, питающих асинхронные двигатели.

В практике потребителя часто интересует механическая характеристика двигателя

$$n_2 = f(M) \text{ при } U_1 = \text{const}$$
$$\text{и } f_1 = \text{const}.$$

Для удобства пользования по осям откладывают $\frac{n_2}{n_1}100\%$ и $\frac{M}{M_н}100\%$. Эта характеристика получается простым перестроением рис. 10-23 и показана на рис. 10-24, где рабочая часть обозначена сплошной линией. Кривая *1* для двигателей нормального исполнения показывает, что асинхронный двигатель обладает жесткой характеристикой скорости, подобно двигателю постоянного тока параллельного возбуждения. Асинхронный двигатель с фазным ротором для регулирования скорости вращения, например для крановых и подъемных устройств, имеет более мягкую характеристику (кривая *2*).

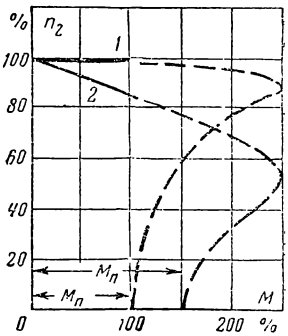


Рис. 10-24. Механическая характеристика двигателя.

10-13. ПУСК В ХОД АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Выводы обмотки статора A, B, C, X, Y, Z подключаются на щиток двигателя, где согласно стандарту они обозначаются: начала C_1, C_2, C_3 и соответственно концы C_4, C_5, C_6. Выводы располагаются так, чтобы их было удобно соединять в звезду или в треугольник, как показано на рис. 10-25, *а*, *б*.

Обмотки каждой фазы статора рассчитаны на определенное фазное напряжение $U_ф$. Поэтому, соединяя обмотку в звезду или в треугольник, двигатель можно присоединять к сетям с напряжениями, отличающимися в $\sqrt{3}$ раз. Например, если $U_ф = 127$ *в*, то при соединении статора в треугольник подключают его к сети с напряжением $U_1 =$ 127 *в*. Если $U_1 = 220$ *в*, то обмотки статора соединяют в звезду. Точно так же другой двигатель можно присоединять к сетям, где $U_ф = 220$ *в* и $U_1 = 380$ *в*.

а) Асинхронный двигатель с фазным ротором (с кольцами) пускается при помощи реостата, включаемого в цепь ротора (рис. 10-26). Убедившись, что сопротивление реостата *1*, подключенного к кольцам ротора *2* при помощи щеток *3*, наибольшее (пуск), включают рубильник *4*. По мере разгона ротора непрерывно уменьшаются его э. д. с. и ток. Это позволяет уменьшать сопротивление реостата *1*, передвигая ступенями подвижные

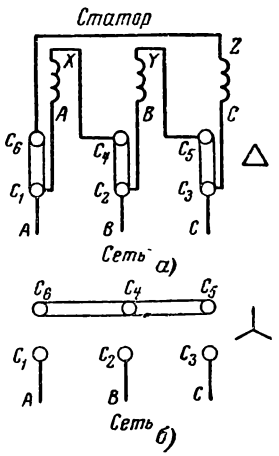


Рис. 10-25. Расположение зажимов обмотки статора.

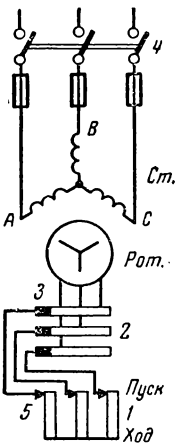


Рис. 10-26. Схема асинхронного двигателя с кольцами.

контакты *5*. К концу пуска ротор оказывается замкнутым накоротко (ход). Реостат рассчитан только на время пуска двигателя. Иногда для уменьшения потерь от трения щеток о кольца двигатель снабжают приспособлением, замыкающим кольца накоротко и поднимающим щетки с колец в конце пуска. Однако в последнее время от этого отказываются из-за эксплуатационных неудобств. Введение сопротивления $r_р$ в цепь ротора преследует цели: уменьшить пусковой ток в роторе, а следовательно, и в статоре, и, увеличив активное сопротивление $r_2 + r_р$ до значения x_2, получить $I_2 \cos \Psi_2 =$ макс. (рис. 10-21), тем самым увеличить пусковой момент (кривая *1* на рис. 10-23).

б) Пуск короткозамкнутого двигателя производится прямым включением в сеть (рис. 10-20).

Недостатком такого способа пуска является значительный пусковой ток (4,5—6,5) $I_{1н}$ при относительно малом пусковом моменте $M_п = (1—1{,}6)\, M_н$.

Двигатели очень малой мощности, ротор которых показан на рис. 9-15 и 9-16, имеют круглые пазы (рис. 10-27, *а*). В них заложены медные стержни, сопротивление которых велико по сравнению с x_2 и поэтому пусковой момент двигателей имеет достаточную величину.

У двигателей мощностью более 2—3 *квт* пазы ротора имеют форму, показанную на рис. 10-27, *б*, а при мощности более 20—30 *квт* еще более глубокие. Эти пазы заливаются расплавленным алюминием. При мощностях двигателей более 120—150 *квт* пазы выполняются в виде узкой глубокой щели (рис. 10-27, *в*) и в них закладываются узкие высокие медные стержни.

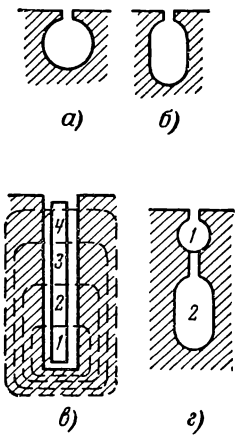


Рис. 10-27. Пазы роторов асинхронных двигателей.

Смысл применения глубоких пазов заключается в следующем. В первое мгновение пуска, когда $f_2 = f_1$, провод, лежащий в глубоком пазу, охватывается магнитными линиями рассеяния так, как показано на рис. 10-27, *в*. Часть провода *1*, находящаяся у дна паза, охвачена наибольшим числом линий, а части *2*, *3*, *4* тем меньшим, чем дальше они от дна паза. Поэтому индуктивное сопротивление нижних слоев металла провода значительно больше, чем верхних, и при $f_2 = f_1$ весь ток ротора оттесняется к поверхности паза. При этом сечение провода используется неполностью, активное сопротивление обмотки r_2 увеличивается и пусковой момент становится бóльшим. По мере разгона ротора частота $f_2 = f_1 s$ уменьшается, явление вытеснения тока прекращается и r_2 автоматически уменьшается. Пуск происходит аналогично включению асинхронного двигателя с реостатом в цепи ротора.

М. О. Доливо-Добровольским был предложен двигатель, в роторе которого располагаются два слоя пазов (рис. 10-27, *г*). В верхних пазах *1* помещается короткозамкнутая обмотка, у которой $r_2 > x_2$, выполненная из латуни или бронзы. В нижних пазах *2* положена другая короткозамкнутая об-

мотка, имеющая $x_2 > r_2$. При пуске, когда $f_2 = f_1$, вращающий момент создается преимущественно верхней обмоткой, по которой протекает активный ток, так как r_2 велико. Эта обмотка называется пусковой. В нижней обмотке благодаря большому индуктивному сопротивлению x_2 ток мал, по приведенным выше причинам вытеснения. В рабочем состоянии, когда $f_2 \approx 0$, ток протекает преимущественно в нижней обмотке, так как ее активное сопротивление r_2 мало. Момент создается этой обмоткой, называемой рабочей.

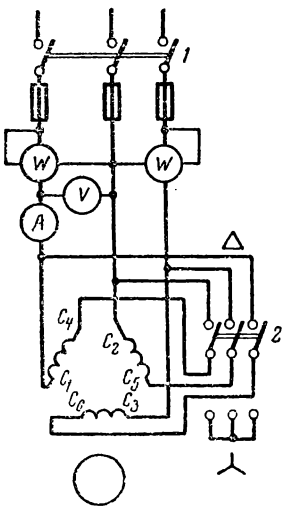


Рис. 10-28. Схема пуска двигателя переключением статора с звезды на треугольник.

Современные мощные сети заводов и электростанций СССР позволяют применять короткозамкнутые двигатели мощностью на многие сотни киловатт. Обычно же мощность включаемого короткозамкнутого двигателя определяется исходя из допустимого при пуске падения напряжения в питающей сети.

Короткозамкнутые двигатели получили большое распространение благодаря простоте устройства, удобству в эксплуатации и сравнительно малой стоимости.

Для понижения пускового тока короткозамкнутых двигателей, работающих при соединении статора в треугольник, часто применяется схема переключения статора на звезду в первом этапе пуска (рис. 10-28). Если замкнуть ножи переключателя *2* вниз и затем включить рубильник *1*, то напряжение на фазу будет в $\sqrt{3}$ раз меньше номинального, а ток уменьшится примерно в 3 раза. Когда ротор пришел во вращение, ножи переключателя перекидывают вверх и двигатель работает при номинальном напряжении. Такой пуск вызывает уменьшение пускового момента примерно в 3 раза, т. е. пропорционально U_1^2, и может применяться только там, где двигатель пускается почти вхолостую, например для привода вентилятора.

Остановка короткозамкнутых двигателей производится простым отключением статора от сети.

10-14. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Асинхронный двигатель применяется преимущественно для привода механизмов, скорость вращения которых регулировать не требуется. Регулирование скорости асинхронного двигателя сопряжено со значительными потерями энергии или требует применения двигателей специальной конструкции.

Принцип регулирования скорости двигателя с кольцами объясняется на рис. 10-29. К статору двигателя *1* подводится мощность P_1, что показано на энергетической диаграмме справа. За вычетом потерь в статоре $W_{ст}$ остается мощность вращающегося потока $P_{эм} = M\omega_1$, называемая электромагнитной мощностью; она передается на ротор *2*. Чтобы получить мощность $P_2 = M\omega_2$ на валу двигателя *3* следует из электромагнитной мощности вычесть потери ротора $W_р$. Искусственным увеличением потерь в цепи ротора, включая реостат (рис. 10-26), можно уменьшить P_2, что показано пунктиром на рис. 10-29. Если момент сопротивления приводимого двигателем механизма постоянный, то и вращающий момент двигателя постоянный, а уменьшение $P_2 = M\omega_2$ происходит за счет уменьшения скорости вращения. В данном случае при желании понизить скорость, например, на 20% приходится потерять 20% энергии на нагрев реостата.

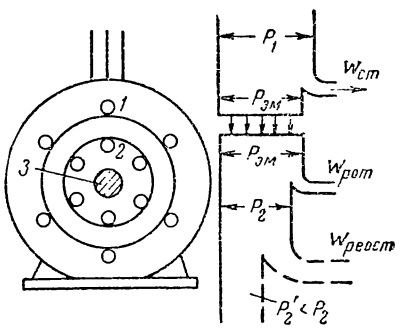


Рис. 10-29. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя.

Другой способ регулирования, применяемый для короткозамкнутых двигателей, заключается в изменении скорости вращения потока

$$n_1 = \frac{f_1 \cdot 60}{p}.$$

Для этого существуют специальные многоскоростные двигатели, которые позволяют изменять скорость n_1 ступенями

(3 000—1 500 *об/мин*, 1 000—500 *об/мин*), т. е. в 2 раза. Каждая фаза обмотки делится на две равные части, которые могут соединяться последовательно или параллельно (рис. 10-30). При параллельном соединении n_1 вдвое больше, чем при последовательном, в соответствии с этим меняется и скорость ротора n_2. Для получения четырех скоростей на статор укладывают две отдельные обмотки, каждая из которых переключается на свои две скорости. Двигатели с переключением полюсов применяются для привода вентиляторов и металлорежущих станков, что в последнем случае позволяет упростить коробку скоростей.

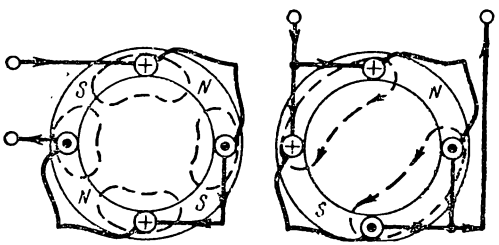


Рис. 10-30. Схема соединения обмоток двухскоростного двигателя.

Сравнительно редко, в специальных устройствах, асинхронные двигатели питаются от генератора переменной частоты f_1. Тогда при изменении f_1 меняется скорость магнитного потока n_1 и ротора n_2.

В связи со способностью асинхронных двигателей менять скорость с изменением частоты питающего тока явилась возможность удовлетворить спрос промышленности в тех случаях, когда требуется очень высокая скорость вращения; это шлифование отверстий малого диаметра, внутришлифовальные операции при производстве шариковых подшипников и др. Скорость вращения шпинделя шлифующего круга достигает при этом 200 000 *об/мин*. Такой скорости не дает ни одна механическая передача.

Так появились высокочастотные короткозамкнутые двигатели с ротором в виде цельного цилиндра из высококачественной стали и статором, питаемым генератором высокой частоты. При $p = 1$ и $f_1 = 2\,000$ *гц* скорость вращающегося потока $n_1 = 120\,000$ *об/мин*. Если скольже-

ние, например, $s = 0{,}08$, то скорость ротора $n_2 =$ $= 110\,400$ *об/мин*. Труднейшей задачей при конструировании таких электрошпинделей является устройство подшипников и их охлаждение.

10-15. ДВУХФАЗНЫЙ И ОДНОФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Два переменных тока одинаковой амплитуды, одинаковой частоты, сдвинутые по фазе на $^1/_4$ периода, называются двухфазным током. Будучи пропущен по двум обмоткам, сдвинутым на 90 *эл. град.* в пространстве, двухфазный ток образует вращающийся магнитный поток, так же как и трехфазный.

а) Двухфазный асинхронный двигатель получил большое

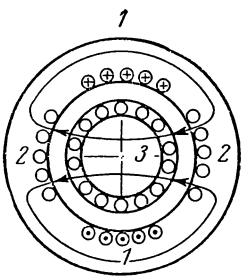


Рис. 10-31. Принцип устройства двухфазного асинхронного двигателя.

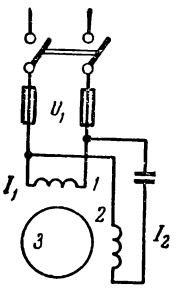


Рис. 10-32. Схема пуска двухфазного двигателя.

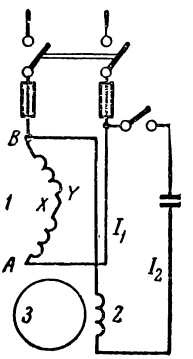


Рис. 10-33. Схема однофазного асинхронного двигателя.

распространение в схемах автоматики. Он имеет две обмотки на статоре *1*, *2* и короткозамкнутый ротор *3* (рис. 10-31). Схема включения двигателя показана на рис. 10-32. Сдвиг фаз между токами I_1 и I_2 достигается включением в одну из фаз конденсатора. Изменение направления вращения получается при изменении направления тока в одной из фаз, а регулирование скорости ротора — повышением или понижением одного из напряжений. Для применения в автоматических устройствах двигателю при конструировании придаются особые свойства (см. § 12-3).

б) Однофазный асинхронный двигатель получил распространение, по преимуществу, при

мощности менее 0,5 *квт*. Он имеет (рис. 10-33) однофазную рабочую обмотку статора *1*, подобную двум фазам трехфазной обмотки, соединенной в звезду, и короткозамкнутый ротор *3*. Переменный ток I_1, проходящий по обмотке статора *1*, вызывает пульсирующий магнитный поток, который не создает пускового момента. Для получения этого момента в статоре помещают вспомогательную обмотку *2*, расположенную со сдвигом на 90° относительно рабочей обмотки. В обмотку *2* пропускают ток I_2, сдвинутый при помощи конденсатора на $^1/_4$ периода относительно тока I_1. Вращающийся магнитный поток приводит ротор во вращение, после чего вспомогательная обмотка отключается,

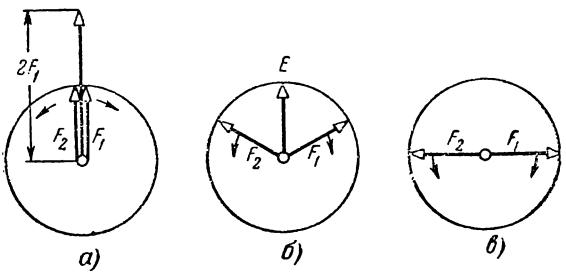


Рис. 10-34. Разложение пульсирующей н. с. на две вращающиеся.

а ротор продолжает вращаться в пульсирующем потоке обмотки *1*. Если обмотка, включенная через конденсатор, не отключается во время работы, то двигатель носит название конденсаторного.

Такое явление наблюдается в трехфазном асинхронном двигателе. При перегорании предохранителя в одной из фаз работающего двигателя фаза отключится, а ротор будет продолжать вращаться в пульсирующем магнитном поле, если его нагрузка не превышает 50—55% номинальной. Однако пуск трехфазного двигателя при обрыве одной фазы невозможен.

Причина этого в следующем. На рис. 10-34,*а* представлены векторы двух равных н. с. F_1 и F_2. Они вращаются в разные стороны с равной скоростью n_1 и за один период делают один оборот. В положении, показанном на рис. 10-34,*а*, сумма мгновенных значений н. с. равна $F_1 + F_2 = 2F_1$. Ось суммарной н. с. совпадает с осью этих двух н. с. Через $^1/_6$ периода (рис. 10-34, *б*) н. с. повернутся на 60°, и, сумми-

руясь, дадут результирующую н. с. $\bar{F} = \bar{F}_1 + \bar{F}_2$. Через $^1/_4$ периода (рис. 10-34, *в*) сумма их равна нулю и т. д. Однако ось пульсирующей н. с. остается неподвижной. Отсюда следует, что две вращающиеся н. с. дают суммарную н. с., пульсирующую с частотой тока по неподвижной оси и достигающую положительного и отрицательного максимумов, равных арифметической сумме двух вращающихся н. с.

Таким образом, если пускается однофазный двигатель без пусковой обмотки или трехфазный с отключенной фазой, то пульсирующий магнитный поток $\Phi_п$, созданный пульсирующей н. с. $F_п$ статора, можно считать состоящим из двух равных потоков, вращающихся в разные стороны с равной скоростью и созданных каждый своей н. с. Потоки наводят в обмотке ротора две э. д. с. и два тока и создают с этими токами два равных вращающих момента, действующих в разные стороны. Естественно, что ротор вращаться не может.

Однако, если каким-либо способом привести ротор во вращение в любую сторону, то он будет подхвачен тем вращающимся потоком статора, который вращается согласно с ротором. Этот поток и создающую его н. с. называют п р я м ы м и ($\Phi_{пр}$ и $F_{пр}$). Поток создает в роторе, вращающемся со скоростью n_2, э. д. с. $E_{2пр}$ и ток $I_{2пр}$, а в результате — вращающий момент $M_{пр}$, как в трехфазном двигателе. При этом скольжение $s_{пр} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \approx 0$, так как $n_2 \approx n_1$.

Вторая н. с. вращается встречно ротору и созданный ею вращающийся поток и она сама называется о б р а т н ы м и ($F_{обр}$ и $\Phi_{обр}$). Они вращаются по отношению к ротору со скоростью $n_1 + n_2 \approx 2n_1$, т. е. при скольжении $s = \frac{n_1 + n_2}{n_1} \approx 2$. Частота $E_{2обр}$ и $I_{2обр}$, наведенных обратным потоком статора в роторе, приблизительно равна $2f_1$. При этом реактивное сопротивление ротора $x_{2обр} = 2\pi f_2 L_2$ так велико, что ток $I_{2обр}$ отстает от э. д. с. почти на 90°. Все это показано на рис. 10-35, где $F_{обр}$ и $\Phi_{обр}$ — обратная н. с. статора и совпадающий с ней обратный поток, а $E_{2обр}$ и $I_{2обр}$ — отстающая от потока на 90° э. д. с. ротора и отстающий от э. д. с. почти на 90° ток.

Естественно, что $I_{2обр}$ создает свою н. с. ротора $F_{2обр}$. Она в фазе с $I_{2обр}$ и почти в противофазе с н. с. статора

$F_{обр}$. Обе эти н. с. практически компенсируют друг друга ($F_{рез} \approx 0$) и обратный поток ничтожно мал. Поэтому создаваемый током $I_{2\,обр}$ обратный вращающий момент $M_{обр}$

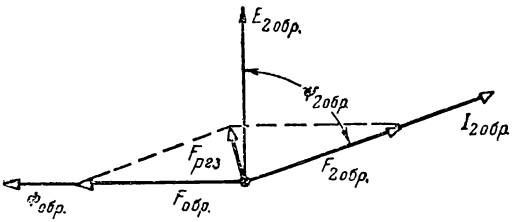


Рис. 10-35. Диаграмма компенсации обратновращающейся н. с.

очень мал, а результатирующий вращающий момент двигателя

$$M = M_{пр} - M_{обр} \approx M_{пр}.$$

в) Однофазный асинхронный двигатель с экранированными полюсами, выполняемый на мощности 0,5—30 *вт*, очень прост по конструкции и получил широкое распространение там, где не требуется большой пусковой момент. На рис. 10-36 показан статор с выступающими полюсами *1*, на которых помещена однофазная обмотка, состоящая из двух катушек *2*. Эта обмотка создает пульсирующий поток. Полюсные наконечники имеют с одной стороны пазы, в которые помещены короткозамкнутые кольца *3*, играющие роль вторичной обмотки трансформатора. В них наводятся токи, сдвинутые по фазе относительно тока в обмотке полюсов, и вследствие пространственного сдвига обмоток в воздушном зазоре получается слабый бегущий поток. Короткозамкнутый ротор *4* приходит во вращение со скоростью n_2, меньшей n_1. Для улучшения рабочих характеристик двигателя между полюсами накладываются магнитные шунты *5* из стальных пластинок.

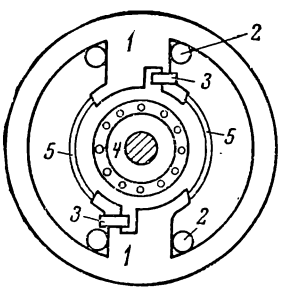


Рис. 10-36. Однофазный двигатель с экранированными полюсами.

10-16. ПОТЕРИ И К. П. Д. АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

При рассмотрении способов регулирования скорости на рис. 10-29 была приведена энергетическая диаграмма асинхронного двигателя. Подводимая к двигателю мощность

$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1. \qquad (10\text{-}13)$$

Если из P_1 вычесть все потери в двигателе, то полезная мощность на валу

$$P_2 = P_1 - (P_{м1} + P_{ст1} + P_{м2} + P_{мех}), \qquad (10\text{-}14)$$

где $P_{м1}$ — потери в меди статора;
$P_{ст1}$ — потери в стали статора;
$P_{м2}$ — потери в меди ротора;
$P_{мех}$ — потери на трение.

Потерями в стали ротора можно пренебречь, так как частота f_2 близка к нулю.

Тогда к. п. д. двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} 100\%. \qquad (10\text{-}15)$$

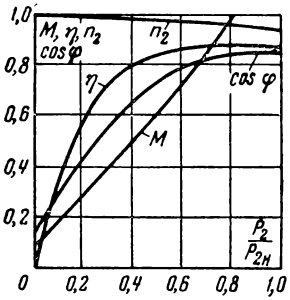


Рис. 10-37. Рабочие характеристики асинхронного двигателя.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя, приведенные на рис. 10-37, сходны с характеристиками двигателя постоянного тока параллельного возбуждения. Электрические машины строятся так, что максимум к. п. д. наступает при номинальной нагрузке или близкой к ней.

10-17. УЛУЧШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ СЕТЕЙ, ПИТАЮЩИХ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Все установки, использующие электрическую энергию переменного тока, должны, по возможности, работать при cos φ, близком к единице. На рис. 10-38 показана однолинейная схема электропередачи энергии от пункта питания *1* к асинхронным двигателям *3* через трансформатор *2*.

Известно, что в проводах электропередачи *4* протекает ток $I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$, показанный на рис. 10-39. Слагающая тока I_a пропорциональна активной мощности P, а реактивная слагающая I_p необходима для поддержания электромагнитных полей трансформатора и двигателей. Ток I_p со-

вершенно необходим и остается практически неизменным независимо от того, какая активная мощность P передается по проводам. Если эта мощность, а следовательно, и ток I_a велики, то угол φ_1 мал, а $\cos\varphi_1$ велик и использование электропередачи хорошее. Когда двигатели недогружены, I_a сильно уменьшен и падает почти до величины $I_{a,\,x}$, угол φ возрастает, а $\cos\varphi$ становится близким к $\cos\varphi_x$. Ток холостого хода $I_x \approx I_p$ достигает 10% $I_н$ в трансформаторах и 40% $I_н$ в асинхронных двигателях, поэтому использование передачи будет плохим. Таким образом, полная нагрузка асинхронных двигателей является необходимым условием их эксплуатации.

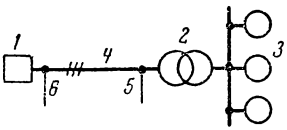


Рис. 10-38. Схема улучшения $\cos\varphi$ в сети.

Иногда при тяжелых пусках асинхронный двигатель приходится выбирать завышенной мощности и он работает с недогрузкой. Тогда, если $P_2 \leqslant (40—45)\% P_{2н}$ и статор нормально соединен в треугольник, его возможно пересоединить в звезду. Активная мощность, а значит и активный ток остаются неизменными, а реактивный ток уменьшается примерно в 3 раза и $\cos\varphi$ возрастает.

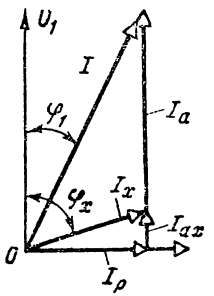


Рис. 10-39. Векторная диаграмма улучшения $\cos\varphi$ в сети.

Ранее было указано, что увеличение $\cos\varphi$ возможно путем включения конденсаторов в точке *5* или лучше *6* сети (рис. 10-38). Однако при больших реактивных тока бóльший эффект дают синхронные компенсаторы, о которых будет сказано в главе синхронных машин.

10-18. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ТРЕХФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ

Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с содержанием § 10-5, 10-13.

Описание работы

Схема включения короткозамкнутого асинхронного электродвигателя показана на рис. 10-28. Для пуска электродвигателя нужно, поставив ножи переключателя *2* в такое положение, при котором

статор соединен в звезду, замкнуть трехполюсный рубильник *1*. Когда электродвигатель пришел во вращение, переключают статор на треугольник. Пуск электродвигателя производится вхолостую при номинальном напряжении ($U_1 = U_н$). Записав показания приборов при холостом ходе, можно нагружать электродвигатель до тех пор, пока ток не достигнет $I_н$. Предполагается, что нагрузка создается механическим тормозом. Записывают пять-шесть значений тока I_1, мощности P_1, напряжения U_1, скорости вращения ротора n_2 и силы на тормозе F. По полученным данным производят вычисление.

Момент M, мощность P_2 и к. п. д. η можно вычислить по формулам, приведенным в § 8-25.

Для пуска электродвигателя с фазным ротором реостат присоединяют по схеме на рис. 10-26, а статор соединяется звездой или треугольником в зависимости от напряжения сети.

План работы

1. Ознакомиться с электродвигателем и пусковым приспособлением, записать основные технические данные электродвигателя и электроизмерительных приборов.
2. Собрать схему (рис. 10-28) и показать ее руководителю. Включить короткозамкнутый двигатель при помощи переключателя *2*.
3. Снять и построить рабочие характеристики двигателя: I_1, P_1, M, s, $\cos\varphi$, η в зависимости от P_2.
4. Пустить асинхронный двигатель с фазным ротором. Изменить направление вращения ротора.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

11-1. НАЗНАЧЕНИЕ СИНХРОННЫХ МАШИН

Механическая энергия превращается в электрическую почти исключительно синхронными генераторами. Так называются электрические машины, у которых скорость вращения ротора жестко связана с числом пар полюсов и частотой тока,

$$n = \frac{f \cdot 60}{p}.$$

При промышленной частоте $f = 50$ *гц* и $p = 1, 2, 3$ и т. д. роторы синхронных машин имеют скорости вращения $n = 3\,000, 1\,500, 1\,000$ *об/мин* и т. д. Синхронные генераторы, приводимые во вращение быстроходными паровыми турбинами, называются турбогенераторами и имеют обычно $n = 3\,000, 1\,500$ *об/мин*. Число пар полюсов их 1, 2.

Синхронные генераторы, которые вращаются тихоходными гидравлическими турбинами, использующими энергию воды равнинных рек и водохранилищ, называются гидрогенераторами. Так как гидравлическая турбина не может в этом случае быть быстроходной, то для получения тока стандартной частоты 50 *гц* число пар полюсов гидрогенератора приходится делать большим. Так, гидрогенераторы Братской ГЭС по 225 000 *квт*, 15 750 *в*, $\cos\varphi = 0{,}85$ построены на $n = 125$ *об/мин* при $p = 24$. Гидрогенераторы Красноярской ГЭС на 500 000 *квт*, 15 750 *в*, $\cos\varphi = 0{,}85$ имеют $n = 93{,}8$ *об/мин* и $p = 32$.

Синхронные машины работают также и в режиме электродвигателей, с успехом заменяя асинхронные электродвигатели больших мощностей. Они применяются для привода мощных насосов и воздуходувок.

Синхронные двигатели, работающие вхолостую и имеющие поэтому облегченную механическую конструкцию, называются синхронными компенсаторами и служат для улучшения $\cos\varphi$ сетей и к. п. д. электростанций.

11-2. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Синхронные машины имеют две основные части: статор с помещенной на нем обмоткой, в которой наводится э. д. с. и поэтому называемой обмоткой якоря, и

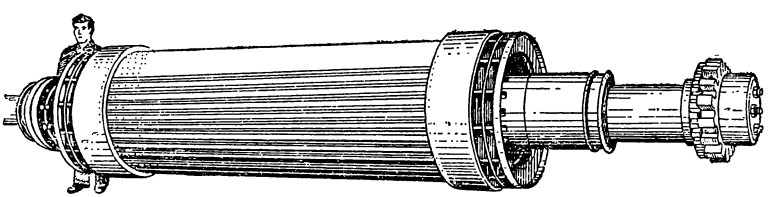


Рис. 11-1. Общий вид ротора турбогенератора.

ротор, который при нормальном исполнении машин несет полюсы с обмоткой возбуждения. Обмотка статора (якоря) вполне подобна обмотке статора асинхронного двигателя (рис. 10-9 — 10-12). Ротор турбогенераторов имеет вид цилиндра, с помещенной в пазах его обмоткой возбуждения (рис. 11-1). Пазы ротора и секция обмотки возбуждения схематически показаны на рис. 11-2. Ротор тихо-

ходной машины имеет выступающие полюсы, подобно показанному схематически на рис. 11-3.

Во всех случаях ток к обмотке возбуждения *1* подводится через щетки *2* и контактные кольца *3* от возбудителя *В* — специального генератора постоянного тока, обычно параллельного возбуждения (рис. 11-4), помещенного на общем валу с ротором или механически соединенного с ним. В последнее время постоянный ток для

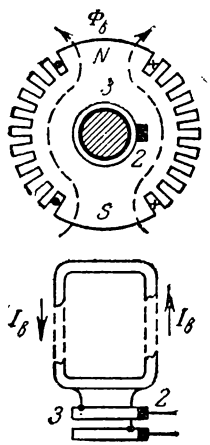


Рис. 11-2. Ротор турбогенератора без обмотки и одна секция обмотки возбуждения.

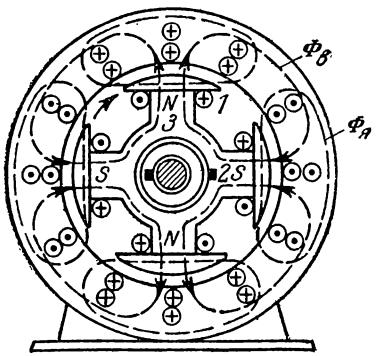


Рис. 11-3. Схема тихоходного синхронного генератора.

возбуждения получают иногда от ртутных, полупроводниковых и механических выпрямителей.

Для машин малой мощности часто применяют обращенную конструкцию, при которой полюсы неподвижны, а обмотка якоря вращается.

Генератор работает следующим образом. Ротор машины (рис. 11-3) приводится во вращение первичным двигателем с номинальной скоростью, которая поддерживается постоянной автоматическим регулятором скорости двигателя. После этого возбуждают генератор, подавая ток возбуждения $I_в$ (рис. 11-4) в обмотку ротора *1*. Вращающийся с постоянной скоростью поток полюсов $\Phi_в$, пересекая обмотку якоря *4*, наводит в ней э. д. с.

$$E_0 = 4{,}44\Phi_в f w k_0, \qquad (11\text{-}1)$$

называемую э. д. с. холостого хода.

Характеристика холостого хода синхронного генератора $E_0 = f(I_в)$ при $I = 0$ и $f = \text{const}$ вполне аналогична такой же характеристике генератора постоянного тока с независимым возбуждением.

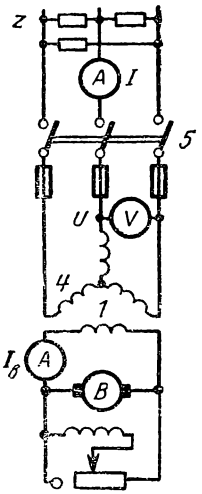


Рис. 11-4. Схема включения генератора.

11-3. РАБОТА ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ

В синхронных генераторах ток нагрузки I, протекающий по цепи якорь — потребитель (рис. 11-3, 11-4), обычно сдвинут по фазе на некоторый угол Ψ относительно э. д. с. E_0, созданной потоком полюсов $\Phi_в$. Сдвиг этот зависит от вида нагрузки потребителя z и параметров генератора. Обычно ток бывает отстающим.

Ток якоря I создает н. с. якоря $F_я$, а последняя — поток якоря $\Phi_я$ (рис. 11-3), в результате чего возникает р е а к ц и я я к о р я. Однако влияние ее на режим работы значительно больше, чем в генераторе постоянного тока. Если представить себе, что ток I совпадает по фазе с э. д. с. (рис. 11-3), то поток якоря $\Phi_я$, созданный группами проводов якоря (по три), будет направлен поперек полюсных наконечников. Возникает такая же п о п е р е ч н а я р е а к ц и я я к о р я, как в генераторе постоянного тока (см. § 8-8). Если же ток I отстает от э. д. с., как показано на рис. 11-5 для двухполюсного генератора, то часть магнитных линий якоря замкнется вдоль полюсов, сильно размагничивая машину. Направление э. д. с. в проводах якоря (рис. 11-5) предположено таким же, как на рис. 11-3. Действие этой продольной реакции якоря тем сильнее, чем больше угол сдвига фаз между током I и э. д. с. E_0 приближается к 90 *эл. град.*

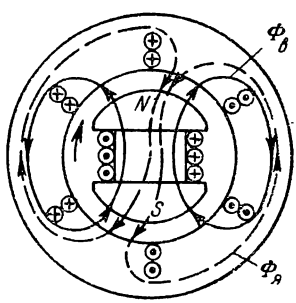


Рис. 11-5. Реакция якоря синхронного генератора.

Под действием реакции якоря результирующий магнитный поток машины Ф уменьшается и э. д. с. нагруженной машины E значительно меньше E_0. Падение напряжения в проводах якоря $I\sqrt{r_я^2 + x_s^2} \approx Ix_s$ также больше, чем в машинах постоянного тока, и поэтому процентное изменение напряжения синхронного генератора при отстающем токе очень велико

$$\Delta U = \frac{E_0 - U_н}{U_н} 100\% = $$
$$= (20 - 40)\% U_н. \quad (11\text{-}2)$$

На рис. 11-6 показана внешняя характеристика синхронного генератора при отстающем токе, т. е.

$$U = f(I) \text{ при}$$
$$I_в = \text{const}, \ f = \text{const}.$$

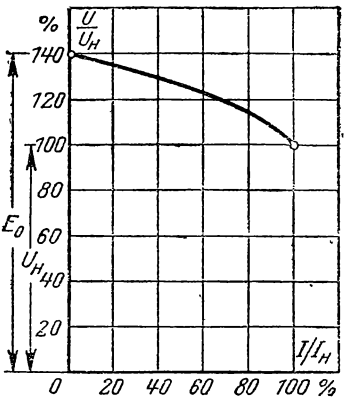


Рис. 11-6. Внешняя характеристика синхронного генератора.

Все сказанное иллюстрируется векторной диаграммой генератора (рис. 11-7), подобной диаграмме для вторичной цепи трансформатора (см. рис. 9-9). Намагничивающая сила ротора $F_в$ создает поток $\Phi_в$, который при холостом ходе наводит э. д. с. E_0. Если в обмотке якоря протекает ток I, отстающий от э. д. с. E_0 на угол Ψ, то н. с. якоря $F_я$, совпадающая по фазе с I, сдвинута от н. с. $F_в$ на угол, бо́льший 90°. Суммарный поток Ф нагруженной машины создается результирующей н. с. $F = F_в + F_я$ и, следовательно, при нагрузке создается э. д. с. $E < E_0$. Вычитая из E падение напряжения в якоре Ix_s, получают напряжение на зажимах генератора U. В данном случае x_s есть сопротивление, вызванное потоками рассеяния обмотки якоря.

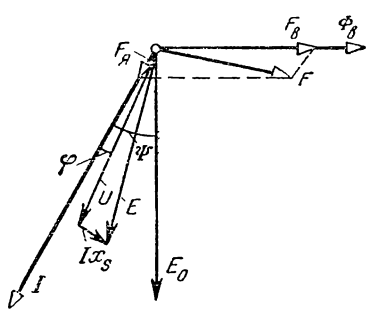


Рис. 11-7. Векторная диаграмма синхронного генератора.

11-4. ВКЛЮЧЕНИЕ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ

Чем вызывается необходимость включения на параллельную работу электрических машин, уже говорилось при рассмотрении машин постоянного тока и трансформаторов (§ 8-15 и 9-6). Схема включения на параллельную работу двух однофазных синхронных генераторов показана на рис. 11-8. Статоры двух генераторов условно показаны

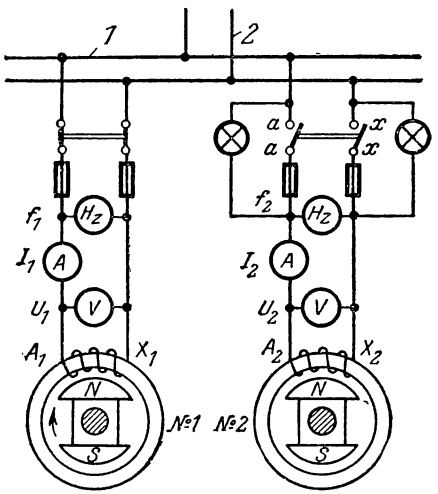


Рис. 11-8. Включение однофазных генераторов на параллельную работу.

в виде стальных колец со спиральными обмотками якорей A_1X_1 и A_2X_2. Генератор № 1 подключен к общим шинам *1*, от которых питается линия потребителя *2*. К этим же шинам требуется подключить генератор № 2. Роторы генераторов показаны в виде двух магнитов, которые приводятся во вращение своими первичными двигателями. Генератор № *1* работает при $U_1 = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$ и $I_1 = \text{const}$.

Для включения на шины генератора № *2* ротор его приводят во вращение, возбуждают и устанавливают $U_2 = U_1$; $f_2 = f_1$. Если бы это были трансформаторы, то было бы достаточно проверить, что разность потенциалов между зажимами a — a и x — x равна нулю и рубильник генератора № *2* замкнуть. В данном случае этого недостаточно,

так как генераторы не связаны механически и электрически и роторы их могут вращаться с отличающимися друг от друга скоростями n_1 и n_2. Пусть вектор U_1 генератора № 1 (рис. 11-9,*а*) вращается в указанном направлении с постоянной угловой скоростью ω_1. Если представить себе, что вектор U_1 неподвижен, то при $n_2 \neq n_1$ вектор э. д. с. E_2, генератора № *2* может вращаться медленнее или быстрее, чем вектор U_1, и значит перемещаться относительно его со скоростью $\omega_1 - \omega_2$. Включить рубильник генера-

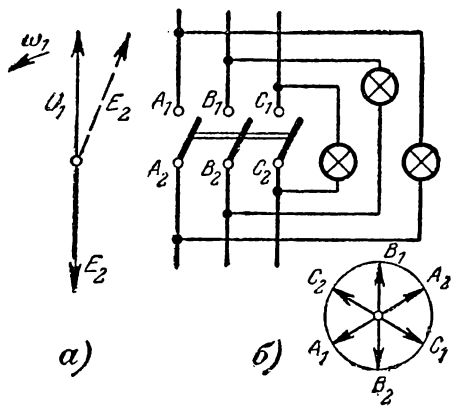


Рис. 11-9. Включение трехфазного генератора на параллельную работу.

тора № *2* можно только в момент совпадения по фазе U_1 и E_2, т. е. когда разность потенциалов между зажимами $a - a$ и $x - x$ равна нулю. В этот момент, в замкнутом контуре якорей генераторов напряжения U_1 и E_2 действуют встречно друг другу и изображены на рис. 11-9,*а* в противофазе.

Для обнаружения этого момента служит приспособление для синхронизации, которое в данном случае показано в виде двух сигнальных ламп. В процессе синхронизации эти лампы периодически загораются и гаснут. Период их мигания тем больше, чем меньше $n_1 - n_2$, и момент включения легко определяется. Когда лампы погасли, рубильник включают; с этого момента генераторы работают синхронно, т. е. их роторы вращаются с неизменными равными угловыми скоростями. Если бы число полюсов генераторов было неодинаковым, то роторы их вращались бы с угло-

выми скоростями, обратно пропорциональными числам их полюсов. Точно так же синхронизируют трехфазные генераторы, присоединяя три лампы на встречные зажимы (рис. 11-9, *б*). Включение генераторов возможно только при одновременном погасании трех ламп. Звездочки векторов U_1 и E_2, т. е. $A_1 B_1 C_1$ и $A_2 B_2 C_2$, показаны для этого момента в противофазе. В действительности на электрических станциях для синхронизации применяется синхроноскоп, позволяющий определить не только момент включения, но и обнаружить медленнее или быстрее, чем надо, вращается ротор подключаемого генератора.

11-5. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С СЕТЬЮ ПРИ НЕИЗМЕННОМ ТОКЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Полагаем, что генератор № *2* (рис. 11-8) включен параллельно с генератором № *1*, обладающим мощностью $P_{\text{н}}$, несоизмеримо большей по сравнению с мощностью $P_{2\text{н}}$ генератора № *2*. В этом случае любые операции с генератором № *2* не вызовут изменения U_1 и f_1 генератора № *1*. Рассмотрение ведется для одной фазы.

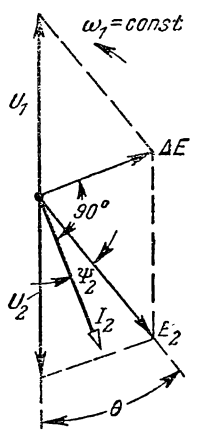


Рис. 11-10. Векторная диаграмма генератора при параллельной работе.

После включения генератора № *2* роторы генераторов вращаются с одной скоростью $n_1 = n_2 = \text{const}$, а векторы U_1 и E_2 находятся в противофазе (рис. 11-9, *а*) и вращаются в одну сторону с $\omega_1 = \omega_{\text{синхр}} = \text{const}$. Первичный двигатель генератора № *2* развивает такую мощность, при которой покрываются потери холостого хода генератора, так как ток $I_2 = 0$.

Если увеличить количество энергии, подводимой к первичному двигателю генератора № *2* (воды, пара и др.), то вращающий момент двигателя станет больше момента сопротивления и ротор генератора № *2* начнет вращаться с ускорением. Его ротор смещается относительно ротора генератора № *1* и появляется угол рассогласования θ. На этот же угол θ забегает вперед по отношению к положению холостого хода э. д. с. E_2, что и показано на рис. 11-10.

Теперь U_1 и E_2 не уравновешиваются, появляется разность ΔE и в замкнутом контуре обмоток якоря протекает ток

$$I_2 = \frac{\Delta E}{x_1 + x_2} = \frac{\Delta E}{x}, \qquad (11\text{-}3)$$

здесь $x = x_1 + x_2$ — реактивное сопротивление обмоток якорей; активным сопротивлением пренебрегают, так как оно очень мало.

Ток I_2 отстает от ΔE на угол 90° (на четверть периода), но почти совпадает по фазе с E_2. Генератор развивает мощность $P_2 = E_2 I_2 \cos \Psi_2$. Активная слагающая тока $I_2 \cos \Psi_2$ создает тормозной момент тем больший, чем больше угол θ. При некоторой величине θ тормозной момент уравновешивает избыточный вращающий, ускорение ротора становится равным нулю и он вращается при $\omega_1 = \text{const}$.

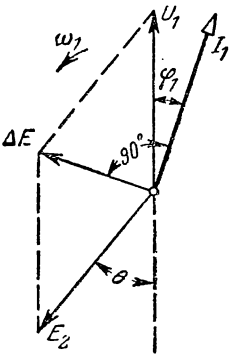


Рис. 11-11. Диаграмма работы синхронной машины при неизменном токе возбуждения.

Таким образом, чтобы нагрузить генератор, следует увеличить вращающий момент первичного двигателя, т. е. увеличить количество подводимой к нему энергии.

Если после включения генератора № *2* вращающий момент его первичного двигателя уменьшить, то ротор начинает отставать от положения холостого хода. Опять появляется угол рассогласования θ, но уже в обратную сторону; э. д. с. отстает от положения холостого хода (рис. 11-11), появляется разность э. д. с. ΔE и ток I_1. Этот ток отстает от ΔE на 90°, но почти совпадает по фазе с U_1. В этом случае генератор № *1* развивает мощность $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$, за счет которой создается вращающий момент, и синхронная машина № *2* переходит в режим двигателя. Такой режим на электростанциях не допускается и машина автоматически отключается от шин при помощи реле обратной мощности.

11-6. СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Выше было показано, что синхронная машина может работать в режиме двигателя, но рассмотренный способ перевода ее в режим двигателя не применяется. Одна из

многих схем пуска показана на рис. 11-12. В этом случае ротор имеет, кроме обычной обмотки возбуждения *1*, условно показанной пунктиром, еще вторую, короткозамкнутую обмотку *4*, как у асинхронного двигателя. Эта обмотка играет роль пусковой.

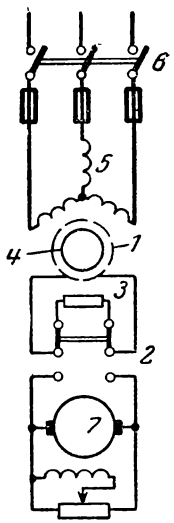


Рис. 11-12. Схема пуска синхронного двигателя.

Пуск происходит следующим образом. Обмотка возбуждения *1* замыкается переключателем *2* на сопротивление *3*, в 8—10 раз бóльшее сопротивления самой обмотки. Статор *5* подключается рубильником *6* к питающей сети и вращающийся магнитный поток, наводя токи в короткозамкнутой обмотке ротора *4*, разгоняет ротор до скорости $n < n_1$. Для того чтобы ротор начал вращаться со скоростью n_1, т. е. синхронно с потоком, ротор возбуждают, перекинув ножи переключателя *2* вниз, на зажимы якоря возбудителя *7*. При этом машина втягивается в синхронизм.

Как указывалось, эти двигатели применяются для привода насосов и воздуходувок при мощностях в сотни и тысячи киловатт. Способность к перегрузке синхронных двигателей, т. е. $M_м/M_н \approx 1{,}8 \div 2{,}5$. При малых мощностях, не превышающих нескольких сот ватт, эти двигатели конструируются без обмотки возбуждения, называются реактивными синхронными двигателями и применяются там, где требуется постоянная скорость вращения (звуковое кино, телемеханика).

11-7. РАБОТА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ ПАРАЛЛЕЛЬНО С СЕТЬЮ ПРИ МЕНЯЮЩЕМСЯ ТОКЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ

В момент включения генератора № *2* на параллельную работу (рис. 11-9, *а*) в обмотке якоря его ток не возникает. Если после включения увеличить ток возбуждения генератора, то его э. д. с. E_2 становится больше U_1 и под влиянием разности $\Delta E = E_2 - U_1$ обмотки якорей генераторов начинает обтекать ток I_2, отстающий от ΔE на 90° по фазе, по причинам, изложенным выше. Диаграмма для этого случая показана на рис. 11-13. Этот ток отстает по фазе на 90°

также и от E_2; поэтому активная мощность, развиваемая генератором № 2 $P_2 = E_2 I_2 \cos \Psi_2 = 0$.

Таким образом, изменение тока возбуждения не приводит к изменению активной мощности генератора при параллельной работе. Однако на щитке генератора всегда указан cos φ (обычно 0,85), на который рассчитан генератор, работающий всегда с отстающим током. Этим указывается, что генератор должен создавать активную мощность $P = E_2 I_2 \cos \Psi_2$ и реактивную $Q = E_2 I_2 \sin \Psi_2$. Диаграмма

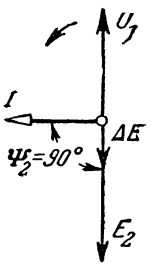


Рис. 11-13. Диаграмма работы синхронной машины при изменяющемся токе возбуждения.

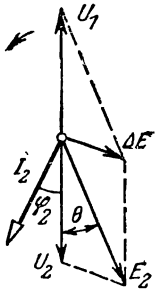


Рис. 11-14. Диаграмма работы синхронного генератора, нагруженного активным и реактивным током.

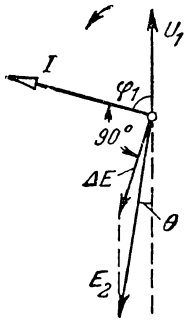


Рис. 11-15. Диаграмма работы синхронного компенсатора.

для этого случая показана на рис. 11-14 и получена из диаграммы 11-10 путем увеличения вектора E_2 при том же угле рассогласования θ.

На рис. 11-12 показана схема включения синхронной машины, предназначенной для работы в режиме двигателя. Однако очень часто устанавливают режим синхронного компенсатора, когда синхронный двигатель работает вхолостую, потребляя незначительную активную мощность, но с сильно опережающим током. Диаграмма работы для этого случая показана на рис. 11-15. Угол θ, определяющий смещение ротора от положения холостого хода, мал, а следовательно, мала активная мощность соответственно холостому ходу. Электродвижущая сила машины $E_2 > U_1$ благодаря повышенному току возбуждения в обмотке ротора. Ток I отстает от ΔE на угол 90°, но опере-

жает напряжение U_1 на угол около 90°, будучи почти целиком реактивным.

Если такая машина включена, как показано на рис. 10-38 в пунктах *5* или *6*, то она, работая, как конденсатор, создает в сети условия, близкие к тем, когда получается резонанс токов (см. § 5-14). Такой вращающийся конденсатор имеет преимущество перед обычным в том, что величину опережающего тока можно менять, изменяя ток возбуждения, а следовательно, E_2, и устанавливать в сети наивыгоднейший cos φ.

11-8. УХОД ЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МАШИНАМИ

Уход за нормально работающей машиной сводится к содержанию машины в чистоте и к наблюдению за исправным состоянием контактных частей машины. Нужно следить также за температурой отдельных ее частей, не допуская их перегрева выше нормы.

Очистка от грязи производится при помощи чистой сухой тряпки, от пыли — при помощи ручного меха без металлического наконечника (сопла).

Коллектор наиболее «капризная» часть машины. Правильно работающий коллектор не должен искрить. Форма его должна быть строго цилиндрической (коллектор не должен «бить»). Изоляция между пластинами не должна выступать над поверхностью коллектора, которая должна иметь гладкий полированный вид без царапин и горелых мест.

Коллектор чистят перед пуском машины чистой полотняной тряпкой, сухой или слегка смоченной бензином. Если на поверхности коллектора обнаружены легкие царапины, шероховатости, загрязненные, слегка подожженные места или немного выступающая слюда, то коллектор подвергается шлифовке. Шлифовку производят при помощи стеклянной бумаги мелких номеров; ни в коем случае не употреблять наждачной бумаги, так как пыль наждака проводит ток. Стеклянную бумагу укрепляют на деревянной колодке, вогнутая часть которой должна быть строго согласована с кривизной коллектора. Колодка с бумагой прижимается к коллектору, а якорь проворачивается. Шлифовка коллектора продолжается до тех пор, пока его поверхность не окажется вполне чистой и гладкой. Ровное потемнение и «побурение» всей поверхности коллектора не является нежелательным и не требует шлифовки коллектора. Нормальная работа щеток и коллектора характеризуется коричневым и даже буро-голубым оттенком рабочей поверхности коллектора.

Проточка коллектора производится лишь в случае действительной необходимости. Миканитовая (слюдяная) изоляция, отделяющая пластины коллектора друг от друга, изнашивается медленнее, чем медь пластин, вследствие чего она с течением времени начинает выступать над поверхностью коллектора. Для устранения этого явления, приводящего к искрению на коллекторе, последний «продороживают», т. е. выпиливают или выфрезеровывают изоляцию между пластинами на глубину 0,5—1 *мм*. Это производится или вручную при помощи

специальной пилки, изготовленной обычно из куска **ножовочного** полотна, зажимаемого в деревянную рукоятку, или при помощи специальных небольших фрез (d = 20—25 *мм*), приводимых во вращение электродвигателем. После «продороживания» коллектор шлифуется описанным выше способом.

Траверса с щеткодержателями должна быть установлена строго по заводским рискам, обеспечивающим правильное расположение щеток на коллекторе.

Кольца машины переменного тока требуют меньшего ухода, чем коллектор. Контактные кольца не должны «бить», не должны иметь царапин, забоин и раковин на поверхности. Щетки должны соприкасаться с кольцами всей своей поверхностью и не свисать с них.

Щетки следует применять той марки, которая рекомендована заводом-поставщиком для данного типа машины. Неправильно подобранный сорт щеток может сделать машину совершенно неработоспособной из-за недопустимого искрения. Правильно работающие угольные щетки должны иметь зеркально блестящую поверхность по всей площади соприкосновения с коллектором или контактным кольцом.

Щетки должны легко перемещаться в обоймах щеткодержателей и прижиматься к коллектору или кольцам с определенным давлением. Щетки могут быть: угольно-графитные, графитные, электрографитированные, медно-графитные и бронзо-графитные. Первые три типа щеток устанавливают в машинах постоянного тока, два последних — в асинхронных и синхронных машинах.

При установке новых щеток их необходимо пришлифовать к коллектору. Для этого под щетку, установленную в щеткодержателе, подкладывают стеклянную бумагу рабочей стороной к щетке и передвигают бумагу назад и вперед. Для правильной шлифовки бумагу нужно обжать по коллектору.

В электрических машинах применяются как подшипники скольжения, так и подшипники качения. Современные машины малых и средних мощностей, как правило, имеют шариковые и роликовые подшипники, крупные машины — подшипники скользящего трения, чаще всего с кольцевой смазкой.

Роликовые и шариковые подшипники требуют минимального ухода. Смазка в них обычно густая (тавот), требует смены 1 раз в 3—4 мес., но очередные ревизии — чистка и закладка смазки — должны производиться с большой тщательностью. Из вскрытого подшипника удаляется старая смазка, все детали его (обойма, шарики) тщательно промываются бензином, после чего закладывается новая смазка. Подшипниковую камеру заполняют смазкой примерно на $^2/_3$ объема, что обеспечивает наилучшую работу подшипника. При всяком подозрении на неисправность лучше подшипник вскрыть, осмотреть и устранить даже самые мелкие дефекты. Таким образом, можно предотвратить серьезные неполадки и крупные расходы.

Подшипники скользящего трения требуют значительно большего внимания и ухода. Все крышки подшипников должны быть плотно закрыты. Надлежит регулярно следить за уровнем масла и вовремя доливать его. Обычно заливка масла требуется 1 раз в неделю. Даже при очень хорошо уплотненных крышках подшипников масло с течением времени загрязняется. Поэтому не реже 1 раза в 1—2 мес. масло надо менять. Для этого через спускное отверстие выпускают старое масло и промывают камеру подшипника керосином. Когда вытекающий

керосин будет совершенно чистым, то, не закрывая спускного отверстия, начинают заливать подшипник чистым маслом с целью предварительно удалить из подшипниковой камеры остатки керосина. Наконец, закрывают спускное отверстие и окончательно заливают подшипник маслом.

Масло, применяемое для смазки подшипников, не должно иметь осадка и содержать смолы и кислоты.

Кроме наблюдений за смазкой, необходимо следить за износом вкладышей подшипников. Это особенно важно в асинхронных двигателях, так как воздушный зазор у них очень мал (0,3—0,5 *мм*) и при износе вкладыша подшипника ротор может задевать за статор. Поэтому воздушный зазор между статором и ротором периодически проверяют при помощи щупов, представляющих собой калиброванные ленты различной толщины. При обнаружении значительных посадок ротора вкладыши подшипников перезаливают. Нагрев подшипников (масла) допускается до 80° С. Контролируется нагрев чаще всего на ощупь (несколько раз в сутки), а в ответственных случаях — ртутным термометром, который погружается в масло подшипника.

Измерение сопротивления изоляции машины производится периодически во время всего срока работы, после длительных перерывов в работе, а также при монтаже и установке машины. Высокое сопротивление изоляции является одним из признаков достаточной электрической прочности изоляции.

Сопротивление изоляции измеряется между обмотками машины, коллектором, кольцами и ее корпусом (землей) при помощи индуктора или мегомметра.

Величина сопротивления изоляции нагретой машины при измерении мегомметром должна быть для каждой фазы статора синхронного генератора не менее 1 *Мом*;для обмотки ротора не менее 0,5 *Мом*; для обмотки статора асинхронного электродвигателя не менее 1 *Мом*; и для ротора не менее 0,2 *Мом*. Величина сопротивления изоляции машин постоянного тока не нормируется.

Если изоляция машины имеет недостаточное сопротивление, что чаще всего происходит, когда машина отсырела, то ее сушат. При наличии сушильных печей ими можно воспользоваться для сушки небольших электрических машин. Температура печи 90—100° С. Сушка длится 8—10 *ч*. Статор и ротор сушатся в отдельности. При отсутствии печей или других сушильных устройств машину сушат нагреванием ее электрическим током.

Машину постоянного тока переводят на работу генератором в схеме с независимым возбуждением. Обмотку возбуждения включают на небольшое напряжение (2—4 *в*), якорь через амперметр замыкается накоротко. Может случиться, что питать обмотку возбуждения током совершенно не нужно, так как для создания необходимого тока в якоре достаточен поток остаточной индукции. Регулируя ток в обмотке возбуждения и скорость вращения якоря, доводят ток якоря до такой величины, чтобы температура обмоток, измеренная термометром, не превышала 70—75° С. Обмотки возбуждения просушиваются теплом нагретого якоря.

Асинхронные двигатели можно сушить следующим способом. Ротор двигателя замыкается накоротко (если он фазный) и заторма-живается. К обмоткам статора подводится такое пониженное напряжение, при котором в обмотках машины получаются токи, нагревающие их до температуры 70—75° С. Величина питающего напряжения

оказывается в 5—7 раз меньше номинального напряжения машины.

Следует подчеркнуть, что упомянутые температуры сушки являются конечными, начинать же процесс надо с меньших температур. Сушка машины — процесс, занимающий (в зависимости от мощности машины) от нескольких часов до 5—6 суток. Процесс сушки заканчивается, когда сопротивление изоляции достигнет нормальной величины.

Металлические реостаты необходимо очищать от пыли и грязи обтиркой или продувкой. Следует следить за исправным состоянием контактов, запиливая подгоревшие места, за нормальным нажимом подвижного контакта, за тем, чтобы спирали не провисали и не касались друг друга и корпуса.

У масляных реостатов надо следить за уровнем масла, добавляя его, если это требуется. Масло применяют трансформаторное, минеральное. Рекомендуется сменять масло 1 раз в 2—3 мес., промывая при этом бак и сопротивления керосином.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

12-1. НАЗНАЧЕНИЕ МАШИН

В устройствах автоматического управления применяются электрические машины, отличающиеся от электрических машин нормального исполнения по конструкции и свойствам, хотя по принципу действия они не отличаются от них. Эти машины выполняются на минимальную мощность от долей ватта до десятков ватт и называются м и к р о м а ш и н а м и.

Нашей промышленностью выпускается большое число микромашин разного типа и в настоящей главе приводятся только краткие сведения об устройстве и принципе работы некоторых из них.

По назначению они делятся на исполнительные двигатели, тахогенераторы, поворотные трансформаторы, машины синхронной связи и применяются в автоматике, телемеханике и вычислительной технике. Применительно к этим машинам и их роли в автоматических устройствах условимся о некоторых понятиях, которые не встречались при эксплуатации машин нормального исполнения.

На рис. 12-1 показан электродвигатель *1*, соединенный муфтой *2* с генератором *3*. Если от питающей сети *4* подается

энергия к двигателю, то он превращает ее в механическую энергию, которая генератором *3* опять превращается в электрическую. Однако здесь главное не вопрос о превращении энергии из одного вида в другой, а передача и преобразование с и г н а л а.

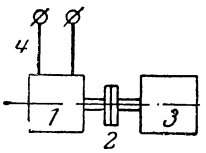


Рис. 12-1. Схема преобразования сигнала.

Подача постоянного напряжения U к двигателю служит командой (приказом) двигателю начать вращение. Двигатель получил сигнал, которым является напряжение, и начал вращаться, т. е. исполнять приказ. С другой стороны вращение двигателя извещает о том, что им сигнал получен. Таким образом, электрический сигнал (напряжение) преобразуется в механический сигнал (вращение вала). Двигатель вращает генератор *3* и на зажимах генератора появляется напряжение, служащее также извещением, что к генератору поступил механический сигнал. Значит в данном примере происходит передача сигнала и его двукратное преобразование, так как подан сигнал постоянным напряжением, а выдан, например, синусоидальным.

12-2. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Исполнительный двигатель постоянного тока независимого возбуждения, схема которого показана на рис. 12-2, получает питание от двух различных источников. К обмотке возбуждения *1* подводится напряжение $U_в$, которое обычно остается неизменным. К обмотке якоря подводится сигнал — напряжение управления $U_у$, изменением которого по величине и направлению управляют двигателем.

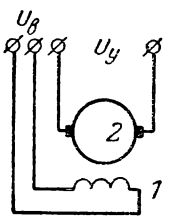


Рис. 12-2. Исполнительный двигатель постоянного тока.

Каждый исполнительный двигатель должен обладать следующими качествами. Он должен быстро пускаться при появлении сигнала и быстро останавливаться, когда сигнал снят. Он не должен обладать с а м о х о д о м, т. е. способностью продолжать вращение при исчезновении сигнала. Скорость вращения двигателя должна плавно и в широких пределах регулироваться, а направление вращения быстро меняться при изменении полярности или фазы сигнала.

Всем этим условиям удовлетворяет исполнительный двигатель независимого возбуждения.

Одной из важнейших характеристик всякого электродвигателя является механическая характеристика (рис. 10-24). Эта характеристика, т. е. $n = f(M)$ при $U_в = \text{const}$ и $U_у = \text{const}$ для данного двигателя, показана на рис. 12-3. По оси абсцисс отложено $M\% = \frac{M}{M_п} 100\%$, где M — вращающий момент, а $M_п$ — пусковой момент — величина для двигателя постоянная.

В машинах постоянного тока $M = c\,\Phi I_я$, а так как при $U_в = \text{const}, I_в$ и $\Phi = \text{const}$, то $M = c_м I_я$. Момент $M = M_п$ наступает при скорости $n = 0$, а обращается момент в нуль, когда $I_я = 0$. Ток якоря

$$I_я = \frac{U_у - E}{r_я}. \qquad (12\text{-}1)$$

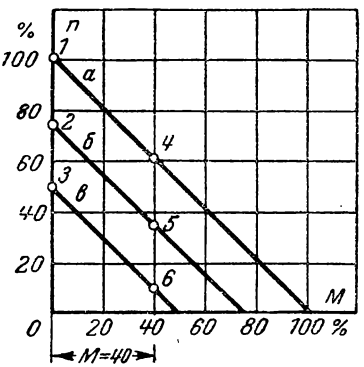


Рис. 12-3. Механические характеристики исполнительного двигателя.

Так как $U_у \neq 0$ и $r_я \neq \infty$, то $I_я$ обращается в нуль при $U_у = E$. Противо-э. д. с. может быть равна напряжению только при некоторой теоретической скорости n_0, при полном отсутствии тормозного момента $M_т$. Эта скорость называется скоростью идеального холостого хода и подобна синхронной скорости n_1 для асинхронного двигателя. Отношение реальной скорости n к n_0, т. е. $n\% = \frac{n}{n_0} 100\%$, отложено на рис. 12-3 по оси ординат.

Отношение

$$\alpha = \frac{U_у}{U_в} \qquad (12\text{-}2)$$

называется коэффициентом управления. На рис. 12-3 кривая *а* построена для $\alpha = 1$, а кривые *б* и *в* соответственно для $\alpha = 0{,}75$ и $\alpha = 0{,}5$. Механические ха-

рактеристики оказываются прямыми линиями. Пропорциональность скорости вращения n моменту на валу M при неизменных напряжениях возбуждения и якоря является обязательным условием возможности применения исполнительного двигателя в автоматических устройствах.

Прямолинейная механическая характеристика обеспечивает устойчивость работы двигателя при всех скоростях вращения, так как всякое понижение скорости n сопровождается пропорциональным увеличением вращающего момента и равновесие обеспечено. Это условие также обязательно для исполнительного двигателя. На рис. 12-4 показана регулировочная характеристика

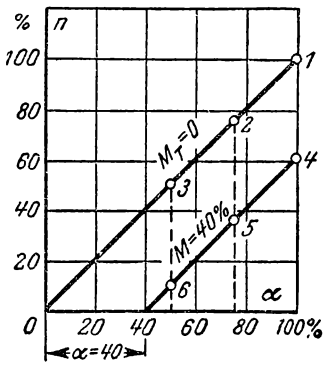


Рис. 12-4. Регулировочные характеристики исполнительного двигателя.

$$n = f(U_у), \text{ или } n = f(\alpha)$$

при $U_в = \text{const}$ и $M = \text{const}$.

Она также должна быть прямой линией, чтобы скорость вращения была пропорциональной величине поданного к якорю сигнала. Она может быть построена по механической характеристике следующим образом. Моменту $M_т = 0$ (идеальный случай) при $\alpha = 1$, 0,75 и 0,5 соответствуют точки *1*, *2*, *3* на рис. 12-3. Эти точки можно построить на рис. 12-4 соответственно для $\alpha = 1$, 0,75 и 0,5 и получить идеальную регулировочную характеристику для $M_т = 0$. Взяв на рис. 12-3 точки *4*, *5*, *6* для $\alpha = 1$, 0,75 и 0,5, но соответствующие $M_т = 40\%$, можно получить на рис. 12-4 вторую характеристику для тех же значений α, но при $M_т = 40\%$. Пересечение последней характеристики с осью абсцисс указывает величину напряжения управления $U_у$, при которой двигатель трогается с места, развивая момент $M = 40\%$.

Исполнительный двигатель постоянного тока независимого возбуждения является лучшим из всех двигателей подобного типа и применяется при автоматическом регулировании и особенно в следящих системах.

12-3. ДВУХФАЗНЫЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Из всех выпускаемых промышленностью микродвигателей около 90% приходится на долю двигателей переменного тока.

Наибольшее применение из двигателей переменного тока в системах автоматики и счетно-решающей техники получил двухфазный асинхронный двигатель с немагнитным полым ротором. Эти двигатели работают как от сети промышленной частоты ($f = 50$ *гц*), так и при частотах (330, 400, 500, 800 и 1 000 *гц*), вращаясь со скоростями от 1 500 до 30 000 *об/мин*. К этим двигателям предъявляются те же самые требования, что перечислены в § 12-2. Однако в полной мере выполнить их не удается, как будет показано ниже.

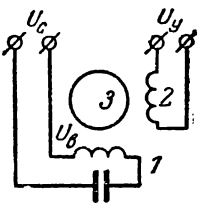


Рис. 12-5. Двухфазный исполнительный двигатель переменного тока.

На рис. 12-5 представлена схема включения двухфазного двигателя, подобная приведенной в § 10-15. Обмотка возбуждения *1*, соединенная последовательно с конденсатором, подключается к сети с напряжением U_c и напряжение $U_в$ обмотки остается постоянным. Сигнал U_y подается к обмотке *2*, называемой о б м о т к о й у п р а в л е н и я. Токи в обмотках оказываются сдвинутыми по фазе на 90° благодаря конденсатору. Короткозамкнутый ротор *3* приходит во вращение, когда подается напряжение U_y, и должен остановиться в момент съема этого напряжения.

Двигатель имеет особую конструкцию, показанную на рис. 12-6. Неподвижный статор состоит из двух частей: внешней *1*, где помещаются обе обмотки, и внутренней *2* — для уменьшения магнитного сопротивления системы. Ротор *4* для уменьшения массы, а следовательно, и для увеличения быстродействия выполняется в виде тонкостенного стакана из алюминиевого сплава и укреплен на оси *3*. Ось пропускается сквозь внутренний статор *2* и вращается в подшипниках торцовых крышек двигателя. Такие двигатели исполняются мощностью 4—70 *вт*; при мощностях 0,1—1,5 *вт* они имеют конструкцию, показанную на рис. 12-7. Внешняя часть статора *1* служит для уменьшения

магнитного сопротивления, а на внутренней части статора *2* помещены обмотки.

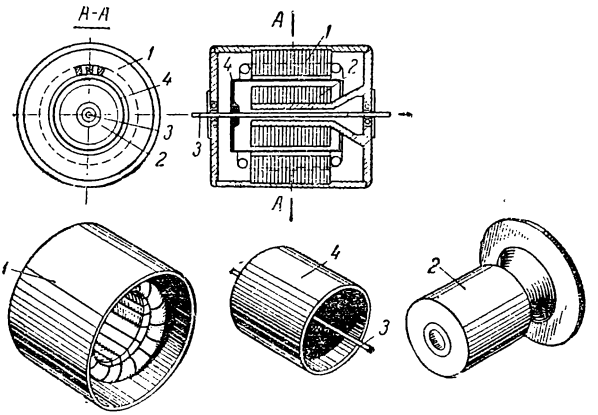


Рис. 12-6. Конструкция двигателя с немагнитным полым ротором.

Двухфазный асинхронный двигатель переменного тока нормального исполнения обладает одним недостатком, ко-

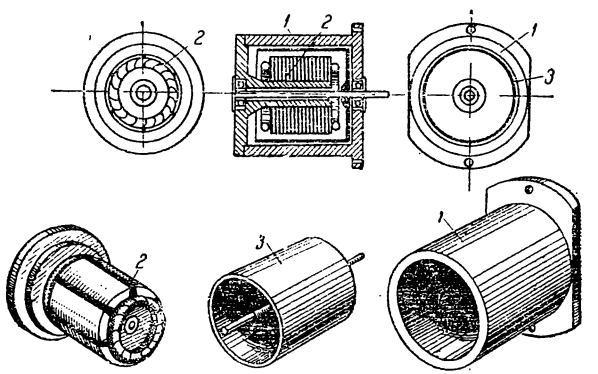


Рис. 12-7. Конструкция двигателя с немагнитным полым ротором и обмоткой на внутреннем статоре.

торый необходимо устранить для применения двигателя в автоматических устройствах.

Недостаток заключается в том, что двигатель, вращающийся под воздействием полей двух обмоток, не останавливается при выключении одной из них — обмотки управления, т. е. имеет самоход. Причины этого были изложены в § 10-15 (рис. 10-35).

Отсутствие самохода в двигателях приведенных выше конструкций (рис. 12-6, 12-7) обеспечивается применением полого немагнитного ротора, имеющего большое активное сопротивление r_2 по сравнению с реактивным x_2. В этом случае диаграмма, представленная на рис. 10-35, изменится так, как показано на рис. 12-8. Благодаря малому значению x_2 оно, даже увеличившись при двойной частоте (при $s = 2$), не будет иметь особого значения по сравнению с r_2. Поэтому ток $I_{2обр}$, созданный э. д. с. $E_{2обр}$, отстает от нее по фазе на значительно меньший угол $\Psi_{2обр}$, чем показано на рис. 10-35. Следовательно, н. с. $F_{2обр}$ не компенсирует н. с. $F_{обр}$ и во вращающемся двигателе имеет место обратный поток $\Phi_{обр}$, создающий с $I_{2обр}$ тормозной момент $M_т$. Этот момент оказывается большим, чем вращающий момент, созданный прямым потоком $\Phi_{пр}$, по той причине, что ток I_2, созданный прямой э. д. с. E_2, мал благодаря большой величине r_2. Торможение в этом случае получается более быстрым, чем при снятии обоих напряжений $U_у$ и $U_в$, так как в последнем случае никаких потоков нет и ротор может вращаться по инерции.

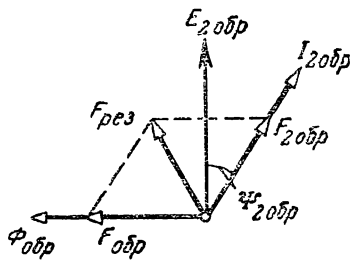


Рис. 12-8. Диаграмма для двухфазного асинхронного двигателя с немагнитным полым ротором, объясняющая отсутствие самохода.

Кроме того, при $r_2 \geqslant x_2$ с увеличением скольжения s вращающий момент непрерывно растет и двигатель работает при любой нагрузке устойчиво, что показано кривой *1* на рис. 10-23.

Механические характеристики для этого двигателя, показанные на рис. 12-9, могут считаться прямолинейными, как у двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Наоборот, регулировочные характеристики (рис. 12-10) могут приближенно считаться прямыми только до $\alpha =$ 30—50%. Поэтому за номинальную скорость двигателя

принимается величина, примерно равная половине скорости при холостом ходе.

В тех случаях, когда быстродействие системы, приводимой двигателем, не играет особой роли, асинхронный двигатель с полым немагнитным ротором с успехом заменяется

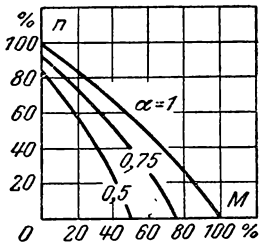


Рис. 12-9. Механические характеристики двухфазного асинхронного исполнительного двигателя.

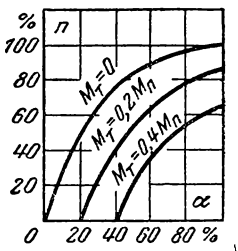


Рис. 12-10. Регулировочные характеристики двухфазного асинхронного исполнительного двигателя.

асинхронным двигателем с обычным короткозамкнутым ротором. Благодаря меньшему воздушному зазору ток намагничивания и, следовательно, потери в обмотке статора у этого двигателя меньше, что приводит к повышению к. п. д. и cos φ. Так как устойчивость работы должна обеспечиваться от холостого хода до остановки двигателя ($s = 0 \div 1$), активное сопротивление ротора r_2 должно быть сделано значительно больше реактивного x_2. Мощность таких двигателей — от долей ватта до нескольких ватт.

12-4. ДВУХФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ФЕРРОМАГНИТНЫМ ПОЛЫМ ИЛИ МАССИВНЫМ РОТОРОМ

Этот двигатель имеет обычную двухфазную обмотку и ферромагнитный ротор в виде полого или сплошного массивного цилиндра. Так как вращающийся магнитный поток замыкается через ферромагнитный ротор, то внутренний статор, подобно показанному на рис. 12-6, отсутствует. Вращающийся поток наводит в поверхности ротора вихревые токи, которые совместно с потоком создают вращающий момент. Активное сопротивление ротора велико ($r_2 > x_2$), что обеспечивает большой пусковой момент, устойчивость работы двигателя на всем диапазоне работы и от-

сутствие самохода. Механические и регулировочные характеристики (рис. 12-9 и 12-10) близки к прямолинейным и тем ближе, чем больше частота питающей сети. Скорость двигателя широко регулируется, а конструкция проста и надежна в эксплуатации. Недостаток двигателя — малые к. п. д. и cos φ. Двигатели широко применяются в схемах автоматики при мощности 5—300 *вт*. Они могут иметь трехфазную обмотку статора и являются конденсаторными двигателями.

В тех устройствах, где стремятся увеличить момент инерции вращающихся частей (магнитофоны, гироскопы), указанные двигатели применяются в обращенном исполнении, когда обмотка статора помещается неподвижно на цилиндре, подобно показанному на рис. 12-7, а ротор в виде стального полого цилиндра вращается вокруг статора.

12-5. ОДНОФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ СО ВСТРОЕННЫМ ПУСКОВЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Принцип работы однофазного асинхронного двигателя был изложен в § 10-15, а его схема показана на рис. 10-33. Для пуска такого двигателя требовалось включение конденсатора, который даже при мощностях двигателя 50—200 *вт* должен иметь емкость 20—30 *мкф*. Размеры этого конденсатора обычно превышают размеры двигателя, что совершенно исключает их применение для многих схем автоматики.

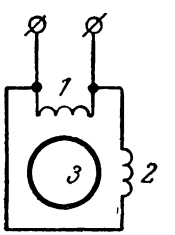


Рис. 12-11. Однофазный асинхронный двигатель с встроенным пусковым сопротивлением.

Двигатель данного типа работает без конденсатора (рис. 12-11) и устроен следующим образом. Статор двигателя, подобно показанному на рис. 10-31, имеет две обмотки. Рабочая обмотка *1* занимает две трети пазов статора, имеет большое число витков и обладает большим индуктивным сопротивлением. Пусковая обмотка *2* лежит в оставшейся части пазов и при малом числе витков имеет большое активное сопротивление по сравнению с индуктивным. Таким образом, по обмоткам, смещенным на 90 *эл. град*, протекают два тока, сдвинутые по фазе почти на четверть периода и образуют вращающийся магнитный поток, увлекающий ротор *3*. Эти двигатели выгодно

отличаются от трехфазных с пусковой емкостью по своим пусковым характеристикам и строятся при $p = 1—2$ на мощности 18—600 *вт* в закрытом обдуваемом исполнении.

12-6. ОДНОФАЗНЫЙ СИНХРОННЫЙ РЕАКТИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Из всех типов синхронных двигателей малой мощности реактивный двигатель является самым распространенным. Он применяется в системах синхронной связи, в установках звукового кино, звукозаписывающих аппаратах (магнитофоны), в лентопротяжных механизмах магнитной памяти вычислительных устройств, в медицинской и бытовой аппаратуре — как приводной двигатель. Двигатель прост по конструкции и дешев.

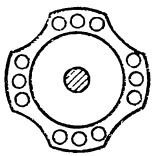


Рис. 12-12. Ротор однофазного синхронного реактивного двигателя.

Синхронный реактивный двигатель мало отличается от асинхронного с короткозамкнутым ротором. На статоре имеются две обмотки, последовательно с одной из которых включен конденсатор (рис. 12-5) для получения вращающегося магнитного потока. Ротор — с короткозамкнутой обмоткой, но имеет на окружности осевые вырезы (рис. 12-12), благодаря чему образуются выступы, без которых двигатель в синхронном режиме работать не может. Принцип работы двигателя объясняется на рис. 12-13.

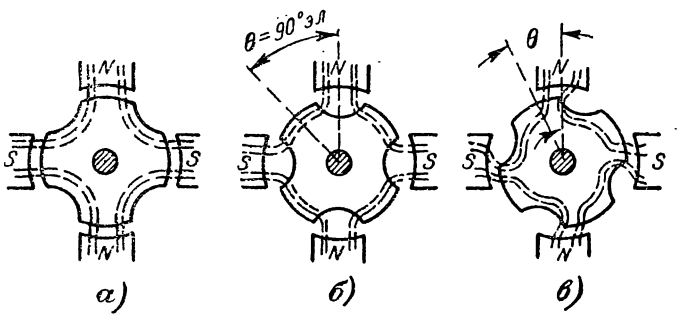


Рис. 12-13. Принцип работы однофазного синхронного реактивного двигателя.

Четырехполюсный поток заменен условно полюсами магнитов. Если между ними поместить ротор в виде цилиндра, то он будет находиться в покое при любом положении.

Однако в том случае, когда он имеет выступы по числу полюсов, он будет в равновесии только в двух положениях: когда угол между осями полюсов и осями выступов равен нулю ($\theta = 0$) или когда этот угол равен 90 *эл. град* (рис. 12-13, *а* и 12-13, *б*). Однако в последнем случае равновесие неустойчивое. При малейшем отклонении от него ротор возвращается в положение, соответствующее углу $\theta = 0$, при котором магнитное сопротивление наименьшее. Если полюсы (поток) начнут вращаться (рис. 12-13, *в*) и появляется угол рассогласования θ, то ротор всегда будет вращаться синхронно с потоком (с полюсами), так как будет существовать усилие, стремящееся уменьшить угол θ.

Для того чтобы получилось указанное положение, ротор должен быть предварительно приведен во вращение со скоростью, близкой к синхронной. Поэтому ротор снабжен короткозамкнутой обмоткой и в начале двигатель работает, как асинхронный, а затем ротор втягивается в синхронизм. Ток в обмотке ротора становится равным нулю и двигатель вращается за счет реактивного момента между вращающимся потоком и выступами ротора. Эти двигатели в однофазном исполнении строятся на мощность до двух десятков ватт при $n_1 = 1\,000 \div 1\,500$ *об/мин*. Недостатки этих двигателей — большой вес на единицу мощности, низкие к. п. д. и cos φ.

12-7. ТРЕХФАЗНЫЙ И ОДНОФАЗНЫЙ СИНХРОННЫЕ ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Указанные выше недостатки реактивных синхронных двигателей заставляют при малых мощностях (3—20 *вт*) применять гистерезисные синхронные двигатели. Двигатель имеет трехфазную или однофазную (рабочую и пусковую) обмотку статора и массивный (или шихтованный) ферромагнитный ротор. Однако если для электрических машин обычно применяется сталь с узкой петлей гистерезиса, то для ротора гистерезисного двигателя применяется магнитно-твердый материал — викеллой с широкой петлей гистерезиса. Для удешевления ротор делается сборным (рис. 12-14) и состоит из втулки *1*, сидящей на

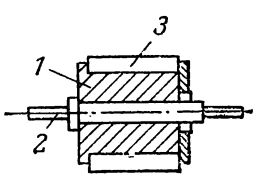


Рис. 12-14. Ротор синхронного гистерезисного двигателя.

валу *2*, и наружного цилиндра *3* из магнитно-твердого материала.

Если представить, что ротор помещен во вращающийся магнитный поток, который на рис. 12-15 заменен двумя полюсами, то в его наружном цилиндре элементарные магнитики вследствие молекулярного трения не смогут мгновенно поворачиваться вслед за осью вращающегося потока. На эти магнитики будут действовать тангенциальные силы $F_т$ и создавать гистерезисный момент $M_г$. Ротор будет увлекаться с синхронной скоростью вслед за потоком. Между осью вращающегося потока и осью элементарных магнитиков образуется угол рассогласования θ, который зависит только от коэрцитивной силы материала.

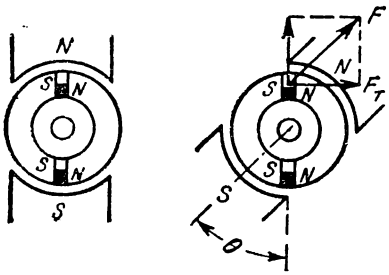


Рис. 12-15. Принцип работы синхронного гистерезисного двигателя.

При пуске двигателя результирующий момент состоит из суммы: гистерезисного момента и момента, создаваемого вихревыми токами $M_в$. Поэтому пусковой момент значителен. В нормальном режиме двигатель вращается синхронно за счет гистерезисного момента, так как при синхронной скорости вихревые токи в роторе отсутствуют.

12-8. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КОЛЛЕКТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Как известно, двигатель постоянного тока не меняет направления вращения при перемене полярности зажимов питающей сети (§ 8-3). Поэтому двигатель с коллектором может работать и от сети переменного тока, если в двигателе предусмотрены соответствующие конструктивные изменения. Эти изменения вкратце заключаются в следующем. Весь магнитопровод должен быть выполнен из стальных листов, как у любой машины переменного тока. Число витков обмотки возбуждения должно быть уменьшено для уменьшения индуктивности. Поэтому двигатели с коллектором, работающие на переменном токе, почти все последовательного возбуждения. Должны быть предусмотрены спо-

собы улучшения коммутации, которая при переменном токе сильно осложняется.

Коллекторные двигатели при мощностях 5—600 *вт* последовательного возбуждения, приспособленные для работы на постоянном токе, при напряжениях 110 и 220 *в* и на переменном токе при напряжениях 127 и 220 *в* и частоте 50 *гц* называются универсальными. Скорость вращения двигателей от 2 000 до 8 000 *об/мин*.

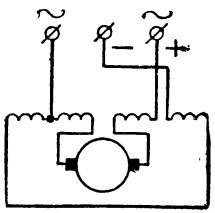


Рис. 12-16. Схема универсального коллекторного двигателя.

Один и тот же двигатель при работе на переменном токе дает значительно худшие показатели за счет увеличения потерь. Для улучшения характеристик двигателя при работе на переменном токе число витков обмотки возбуждения в последнем случае уменьшается.

Схема включения двигателя показана на рис. 12-16. Двигатель применяется для привода всякого рода электроинструмента, в быту и в ограниченном количестве для привода автоматической аппаратуры. Двигатель снабжается фильтром для подавления радиопомех.

12-9. ТАХОГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА

На рис. 12-1 был показан исполнительный двигатель, приводящий во вращение генератор. Входным сигналом у генератора была скорость ω, а выходным — напряжение на зажимах U. Если между входным и выходным сигналами $U = f(\omega)$ сохраняется практически линейная зависимость, то такой генератор называется тахогенератором. На рис. 12-17 эта зависимость, показанная прямой линией *1*, называется идеальной выходной характеристикой тахогенератора.

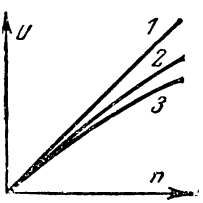


Рис. 12-17. Выходные характеристики тахогенератора.

Основное назначение тахогенераторов — измерять скорость вращения вала исполнительных двигателей. В системах автоматического регулирования скорости тахогенератор играет роль измерительного элемента, указывающего отклонение скорости от заданной величины и выдающего сигнал, который, будучи

преобразован и передан, приводит к восстановлению скорости. Кроме того, тахогенераторы широко применяются для разного рода механических вычислительных операций.

Тахогенератором постоянного тока обычно служит генератор с независимым возбуждением. В некоторых случаях применяется тахогенератор с возбуждением постоянными магнитами.

Если тахогенератор работает с разомкнутыми зажимами, то $E = c_E \Phi n = c\Phi\omega$, при постоянном магнитном потоке Φ будет меняться, в зависимости от угловой скорости ω, по закону прямой линии. Если же на зажимы тахогенератора включено сопротивление и в обмотке якоря протекает ток $I_я$, то вследствие реакции якоря и падения напряжения в проводах и щетках якоря напряжение U будет тем меньше E, чем меньше сопротивление, включенное на зажимы. В этом случае $U = f(n)$, показанные кривыми *2* и *3* на рис. 12-17, будут отклоняться от прямой *1*. Поэтому тахогенератор всегда нагружен постоянным по величине сопротивлением, во много раз превышающим сопротивление обмотки якоря.

12-10. ТАХОГЕНЕРАТОР ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОЛЫМ НЕМАГНИТНЫМ РОТОРОМ

Асинхронный тахогенератор переменного тока применяется в маломощном следящем приводе, в системах автоматического управления и в вычислительных устройствах, работающих на переменном токе.

Конструктивно асинхронный тахогенератор, как правило, имеет ротор в виде полого немагнитного стакана и статор, состоящий из внешней и внутренней частей подобно исполнительному двигателю переменного тока (рис. 12-6). Внутренний статор не имеет обмотки, а на внешнем расположены две обмотки, сдвинутые в пространстве под углом 90°. Одна из обмоток — о б м о т к а в о з б у ж д е н и я *1* (рис. 12-18), к которой приложено напряжение $U_в$ постоянной амплитуды и постоянной частоты, расположена на рис. 12-18 так, что ось ее вертикальна. Другая обмотка — г е н е р а т о р н а я *2*, ось которой расположена горизонтально. Толщина стенок полого ротора *3* показана преувеличенной.

Переменный ток $I_в$, протекая по обмотке статора *1*, создает пульсирующую н. с. $F_{ст}$ и поток $\Phi_{ст}$, который

наводит в теле неподвижного ротора, как во вторичной обмотке трансформатора, э. д. с. и вихревые токи. Направление их встречно направлению тока в обмотке возбуждения, но они на рис. 12-18 не показаны. Этими токами создается н. с. ротора $F_{рот}$, совместно с которой н. с. статора $F_{ст}$ создает продольный поток $\Phi_{пр}$, совпадающий с осью обмотки возбуждения.

Если ротор приведен во вращение, то в его теле создается э. д. с. вращения $E_{вр}$, а значит, и ток, направление которых на рис. 12-18 определено правилом правой руки и показано на роторе. Током ротора создается поперечный поток $\Phi_{п.п}$, ось которого совпадает с осью обмотки статора *2*. Таким образом, создается своеобразный трансформатор, первичной обмоткой которого является ротор, а вторичной — обмотка *2*. Поперечным потоком в обмотке *2* создается трансформаторная э. д. с., частота которой равна частоте тока в роторе и, значит, потока $\Phi_{пр}$. В свою очередь частота потока $\Phi_{пр}$ равна частоте тока возбуждения $I_в$ обмотки статора *1*, которая постоянна. Таким образом, частота э. д. с., наведенной в обмотке статора *2*, постоянна, а ее амплитуда пропорциональна скорости вращения ротора, так как этой скорости пропорциональны амплитудные значения тока ротора и потока $\Phi_{п.п}$.

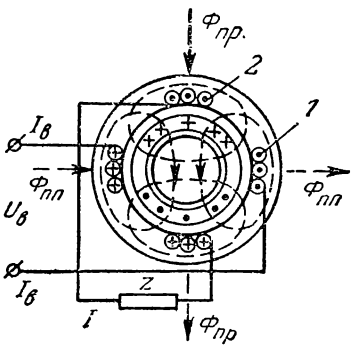


Рис. 12-18. Тахогенератор переменного тока.

Так же как и для тахогенератора постоянного тока, сопротивление нагрузки z должно быть во много раз больше сопротивления обмотки статора *2*.

12-11. ПОВОРОТНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Поворотные (вращающиеся) трансформаторы применяются для получения напряжения, пропорционального углу поворота α или $\sin\alpha$ и $\cos\alpha$. В вычислительных устройствах поворотные трансформаторы используются для решения тригонометрических задач, например для определения гипотенузы прямоугольного треугольника по его катетам.

Поворотный трансформатор (рис. 12-19) состоит из статора *1* и ротора *2*, набранных из листовой электротехнической стали. В пазах статора и ротора помещены обмотки *3* и *4*, каждая из которых состоит из двух обмоток, смещенных одна относительно другой на 90°. Выводы обмоток — статора $c_1c_2c_3c_4$ и ротора $p_1\,p_2\,p_3\,p_4$ помещены на одной из торцовых крышек трансформатора. В тех случаях, когда угол поворота ротора ограничен $\pm 360°$, концы обмоток ротора выводятся не при помощи контактных колец и щеток, а гибкими проводами в виде лент *5*, намотанных на изолирующем барабане, закрепленном на валу ротора *6*.

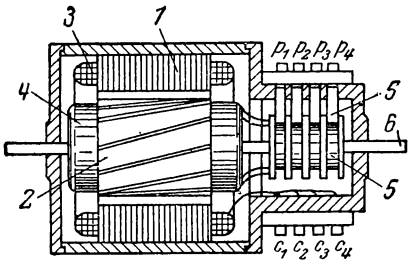


Рис. 12-19. Поворотный трансформатор.

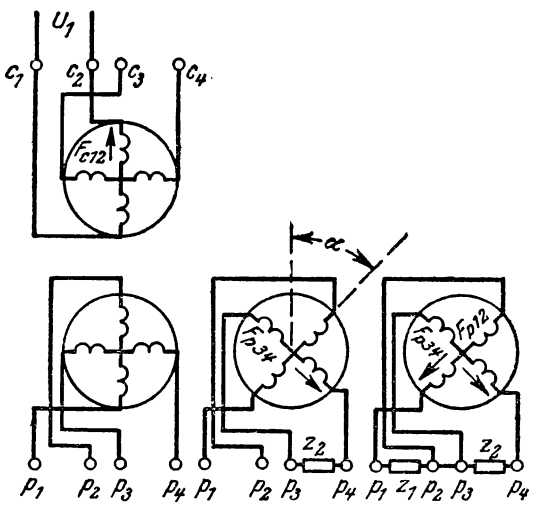


Рис. 12-20. Схема включения обмоток поворотного трансформатора.

Схема включения и расположения обмоток трансформатора показана на рис. 12-20, *а*. Если подать переменное напряжение, например, к обмотке c_1c_2, то в роторной обмотке

p_1p_2, как во вторичной обмотке обычного трансформатора, будет наводиться э. д. с. $E_{р12} = E_м$, поскольку оси обмоток c_1c_2 и p_1p_2 совпадают. Электродвижущие силы двух других обмоток $E_{с34}$ и $E_{р34}$ равны нулю, так как оси этих обмоток перпендикулярны оси обмотки c_1c_2. Если повернуть ротор на угол α (рис. 12-20, *б*), то $E_{р12} = E_м \cos\alpha$, а $E_{р34} = E_м \sin\alpha$. Поэтому обмотка p_1p_2 называется к о с и н у с н о й, а обмотка p_3p_4 — с и н у с н о й. Кривая зависимости $E_{р34} = f(\alpha)$, т. е. синусоида, показана на рис. 12-21 верхней ветвью *1*. Однако такая зависимость получится, если обмотка p_3p_4 не нагружена. Если замкнуть обмотку p_3p_4 на сопротивление z_2 (рис. 12-20, *б*), то благодаря току $I_{р34}$ возникает н. с. $F_{р34}$, направление которой совпадает с осью обмотки p_3p_4, что показано на рис. 12-22.

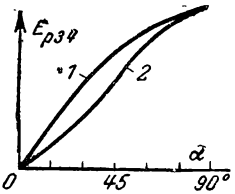


Рис. 12-21. Зависимость э. д. с. поворотного трансформатора от угла поворота ротора.

Эта н. с. состоит из продольной н. с. $F_{пр}$, которая полностью компенсируется увеличением тока в первичной обмотке, как в обычном трансформаторе, и поперечной н. с. $F_{п.п}$. Последняя суммируется с н. с. $F_{с12}$, искажает магнитный поток трансформатора и, следовательно, кривую $E_{р34} = f(\alpha)$, как показано на рис. 12-21 (кривая *2*). Компенсировать поперечную н. с. можно разными способами. Один из них следующий.

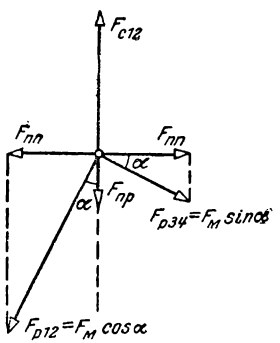


Рис. 12-22. Диаграмма компенсации поперечной н. с. поворотного трансформатора.

В обмотку p_1p_2 включают сопротивление z_1 с таким расчетом, чтобы $z_1 + z_{12} = z_2 + z_{34}$, где z_{12} и z_{34} соответственно сопротивления обмоток p_1p_2 и p_3p_4. Такое включение показано на рис. 12-20, *в*. Тогда для любого угла α н. с. $F_{р34} = F_м \sin\alpha$, а н. с. $F_{п.п} = F_м \sin\alpha \cos\alpha$. С другой стороны н. с. $F_{р12} = F_м \cos\alpha$, а ее поперечная н. с. $F_{п.п} = F_м \cos\alpha \sin\alpha$. Таким образом, обе поперечные н. с. равны и компенсируют друг друга, а кривая *2*, показанная на рис. 12-21, становится практически синусоидальной. Допустимая разность ординат при любом угле α не должна превышать 0,05% ординаты синусоиды.

12-12. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ ДЛЯ СИНХРОННОЙ СВЯЗИ

В следящем электроприводе применяются малогабаритные индукционные электрические машины, называемые с е л ь с и н а м и. По существу это вращающиеся трансформаторы, имеющие на роторе обмотку с кольцами и щетки, и обладающие свойством самосинхронизации, чем и объясняется их название.

На рис. 12-23 показаны два сельсина в одном из возможных исполнений. Каждый сельсин устроен следующим образом. На статорах *1*, имеющих всегда только два выступающих полюса, помещены однофазные обмотки возбуждения *2*,

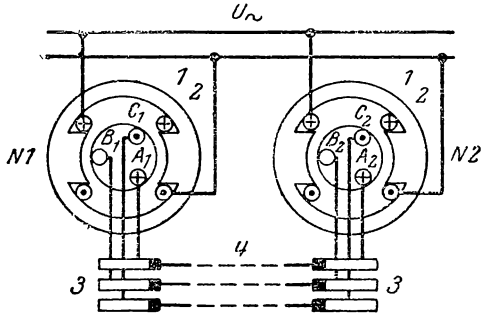


Рис. 12-23. Схема сельсинов при отсутствии угла рассогласования.

подключенные к общей сети переменного тока. В пазах роторов помещены трехфазные обмотки синхронизации, соединенные в звезду, начала которых выведены на контактные кольца *3*. Через щетки сельсины соединены друг с другом линией связи *4*. Сельсины всегда работают в паре (датчик—приемник). Пусть на рис. 12-23 сельсин № 1 служит датчиком сигналов, а сельсин № 2 — приемником их. Схема показывает сельсины, работающие в и н д и к а т о р н о м р е ж и м е, когда производится дистанционная передача угловых перемещений двух или нескольких валов машин или аппаратов, механически не связанных друг с другом.

В представленном на рис. 12-23 положении роторов переменные потоки, созданные обмотками возбуждения, наводят в фазах роторов э. д. с. $E_{A1} = E_{A2}$, $E_{C1} = E_{C2}$, в то время как E_{B1} и E_{B2} равны нулю. В линии связи *4* ток

будет равен нулю, так как в замкнутом контуре фаз A_1 и A_2, C_1 и C_2 действуют встречно две равные и совпадающие по фазе э. д. с. Это положение соответствует моменту включения на параллельную работу двух синхронных машин (рис. 12-24, *а*).

Если механизм, связанный с ротором сельсина № 1, повернуть или он повернулся под воздействием какой-либо причины, например на 30°, то направление э. д. с. в фазах ротора сельсина № 1 будет показанным на рис. 12-25. Электродвижущие силы E_1 и E_2 во всех фазах изменяются пропорционально синусу угла рассогласования θ, что на рис. 12-24, *б* можно показать смещением E_1, на угол θ. В замкнутом контуре обмоток ротора, в каждой фазе, действует разность э. д. с. ΔE и протекает ток

$$I = \frac{\Delta E}{2z}.$$

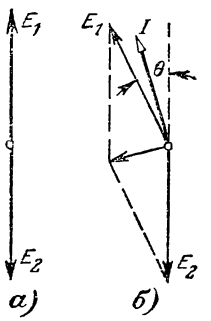


Рис. 12-24. Диаграмма э. д. с. сельсинов при отсутствии и наличии угла рассогласования.

Так как активное сопротивление фазы ротора мало по сравнению с реактивным, то можно считать, что $z \approx x$, и ток отстает от ΔE на угол 90°. Однако, как и в синхронной машине, этот ток почти совпадает с э. д. с. E_1, вызывая тормозной момент на оси ротора сельсина № 1 и вращающий момент на оси сельсина № 2. Направление токов показано на рис. 12-25 и ротор сельсина № 2 стремится повернуться на 30°. Однако угол поворота сельсина-приемника всегда будет меньше, чем требуется, на некоторый угол рассогласования, составляющий 0,25°—0,75°.

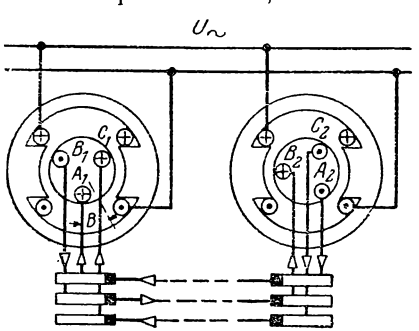


Рис. 12-25. Схема взаимодействия токов в сельсинах при наличии угла рассогласования.

По конструкции сельсины делятся на датчики и приемники; они могут быть контактными, подобно представленным выше, и бесконтактными; обмотки выполняются как

сосредоточенными, так и распределенными; обмотка возбуждения может быть на роторе или на статоре. Пара сельсинов может работать и в трансформаторном режиме, когда она применяется для измерения углов рассогласования командной и исполнительной осей, по величине выходного напряжения сельсина приемника, пропорционального углу перемещения ротора сельсина датчика. Выходная мощность сельсинов не более 20 *вт*, частота 50 и 400, 500 *гц*.

12-13. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВАЛ

Принцип работы машин в синхронной связи, изложенный выше, применяется в устройствах так называемого

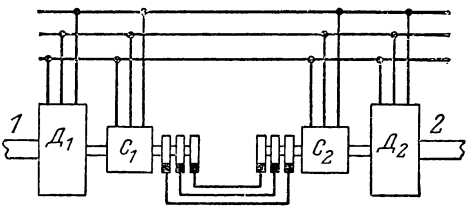


Рис. 12-26. Схема электрического вала.

электрического вала (рис. 12-26). В данном случае C_1 и C_2 — электрические машины нормального исполнения, предназначенные для передачи энергии из одной части схемы в другую.

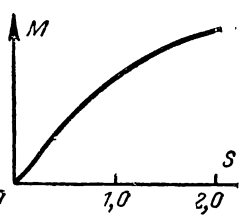


Рис. 12-27. Диаграмма зависимости момента от скольжения для электрического вала.

Два вала *1* и *2*, механически не связанные друг с другом и приводимые своими отдельными двигателями $Д_1$ и $Д_2$, должны работать синхронно. Расстояние между валами таково, что механическая связь их затруднена или невозможна (бумагоделательные машины, портальные краны, замена ходовых винтов в тяжелых токарных станках, карусельные станки и др.). При возникновении угла рассогласования между валами *1* и *2* вспомогательные машины C_1 и C_2 создают дополнительные вращающие моменты, поддерживающие синхронную работу главных двигателей $Д_1$ и $Д_2$. Зависимость

вращающего момента от скольжения $M = f(s)$ показана на рис. 12-27. При малых скольжениях, когда роторы машин C_1 и C_2 вращаются в направлении магнитного потока, развиваемые моменты малы. Для передачи больших моментов при широком изменении скоростей вращения машины C_1 и C_2 работают против потока, когда скольжение, а значит, и момент велики.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

13-1. КЛАССИФИКАЦИЯ И НАЗНАЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Электроника изучает принцип действия, устройство и применение электронных, ионных и полупроводниковых приборов.

Электронными называются приборы, в которых явление тока связано с движением только электронов, при наличии в приборах высокого вакуума, исключающего возможность столкновения их с атомами газа. К этой группе приборов относятся, например, двух- и трехэлектродные лампы, некоторые фотоэлементы, электронно-лучевые трубки и др.

Электронные приборы применяются в выпрямителях, усилителях, генераторах, приемных устройствах высокой частоты, а также в автоматике, телемеханике, измерительной и вычислительной технике.

Ионными называются приборы, в которых явление тока связано с движением электронов и ионов, полученных при ионизации газа или паров ртути летящими электронами. К ним относятся газотроны, тиратроны, ртутные вентили и др.

Ионные приборы отличаются от электронных значительной инерцией вследствие огромной массы иона по сравнению с массой электрона. Поэтому ионные приборы применяются в установках с частотой, не превышающей нескольких килогерц, в выпрямителях средней и большой мощности, в схемах автоматического управления механизмами и др.

Полупроводниками называются приборы, в которых ток создается движением электронов и дырок и используются некоторые особенности полупроводников.

За последний период непрерывно растет применение полупроводников вследствие ряда преимуществ их перед электронными и ионными приборами. Главные из них: малый расход энергии, малые размеры, вес и стоимость, значительная механическая прочность, большой срок службы и простота эксплуатации. В ряде областей радиотехники, энергетики, автоматики, телемеханики и вычислительной техники полупроводниковые приборы с успехом вытесняют электронные и ионные приборы.

13-2. ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ. ФИЛЬТРЫ

Электронная двухэлектродная лампа — д и о д — представляет собой металлический, керамический или стеклянный баллон с двумя металлическими электродами — а н о д о м A и к а т о д о м K (рис. 13-1).

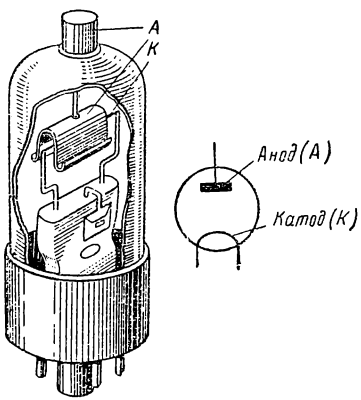


Рис. 13-1. Устройство и условное обозначение двухэлектродной электронной лампы.

В баллоне создан вакуум, не обладающий проводимостью. Необходимые для электропроводности лампы электроны получаются от катода при нагревании его до высокой температуры (700—2 400° C) при пропускании по нему тока от батареи накала или от трансформатора накала.

Для того чтобы покинуть металлический катод, свободные электроны, находящиеся в поверхностном слое его, должны преодолеть силы, действующие на них со стороны положительных ионов металла, т. е. электроны должны совершить некоторую работу, называемую р а б о т о й в ы х о д а W_0. Эта работа равна произведению заряда электрона e_0 и потенциала выхода φ, т. е.

$$W_0 = e_0 \varphi.$$

Величина φ постоянна для каждого металла, следовательно, постоянна для каждого металла и работа выхода W_0.

Эта работа измеряется в электронвольтах (*эв*) и составляет обычно 1—6 *эв*.

При нормальной температуре кинетическая энергия свободных электронов катода недостаточна для того, чтобы покинуть катод. При повышении температуры катода скорости движения свободных электронов возрастают, часть их приобретает кинетическую энергию $\frac{mv^2}{2}$, достаточную для совершения работы выхода W_0, и они покидают катод. Процесс выхода электронов из нагретого металла носит название термоэлектронной эмиссии.

Часто применяются вольфрамовые катоды, покрытые для снижения рабочей температуры и увеличения эмиссии тонкой пленкой окислов металлов — кальция, стронция, бария, имеющих меньший потенциал выхода, чем вольфрам.

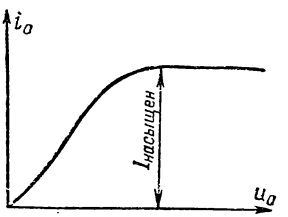


Рис. 13-2. Вольт-амперная характеристика диода.

Соединив катод лампы с отрицательным зажимом, а анод — с положительным зажимом источника питания, т. е. подведя к лампе напряжение u_a, называемое анодным, между электродами лампы получим электрическое поле, под действием которого электроны будут перемещаться от катода к аноду, образуя ток i_a, называемый анодным. Направление этого тока, как и в проводниках, противоположно направлению движения электронов.

На электроны, расположенные вблизи катода, кроме сил поля, созданного анодным напряжением, действуют силы обратного направления, созданные электронами, находящимися ближе к аноду. Вследствие этого электроны вблизи катода тормозятся, скапливаются, создавая объемный отрицательный заряд, который противодействует вылету электронов из катода и движению их к аноду.

Увеличение анодного напряжения u_a вызывает увеличение анодного тока i_a только до определенной величины — тока насыщения (рис. 13-2). При этом все эмиттированные при данной температуре катода электроны достигают анода, следовательно, за каждую единицу времени число электронов, покидающих катод, равно числу электронов, приходящих к аноду.

Соединив катод лампы с плюсом источника питания, а анод лампы с минусом, получим между электродами электрическое поле, под действием которого электроны, вылетевшие из катода, возвратятся обратно, т. е. ток через лампу проходить не будет. Следовательно, лампа пропускает ток только в одном направлении или, что то же — лампа обладает односторонней проводимостью. Приборы, обладающие таким свойством, называются электрическими вентилями.

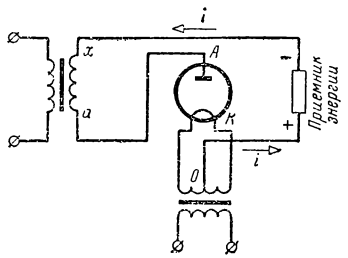


Рис. 13-3. Выпрямление переменного тока электронной лампой.

Двухэлектродные лампы часто используются для выпрямления переменного тока. Лампа, применяемая для выпрямления тока промышленной частоты, называется кенотроном.

Схема однополупериодного выпрямления переменного тока дана на рис. 13-3.

Один зажим вторичной обмотки трансформатора соединен с анодом лампы, второй зажим той же обмотки через приемник энергии соединен со средней точкой O вторичной обмотки трансформатора накала.

Так как лампа обладает односторонней проводимостью, то ток i в цепи $AKO + — xaA$ проходит в течение только того полупериода вторичного напряжения трансформатора u_{ax}, в течение которого анод лампы имеет положительный потенциал относительно катода. Следовательно, в цепи приемника в течение периода проходит одна полуволна тока (рис. 13-4, *а*).

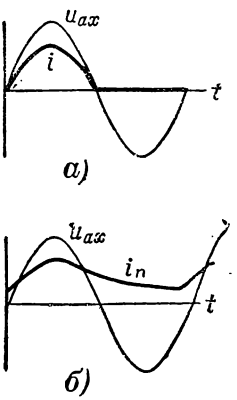


Рис. 13-4. Однополупериодное выпрямление.

Для уменьшения пульсаций тока параллельно приемнику включают конденсатор C. В этом случае, в течение первой четверти периода, при нарастании от нуля до максимума вторичного напряжения трансформатора происходит зарядка конденсатора. В течение остальной части периода происходит

разрядка конденсатора через приемник. Таким образом, ток $i_п$ в приемнике будет проходить в течение всего периода (рис. 13-4, *б*).

Для уменьшения пульсаций тока применяют также реактивную катушку (дроссель), включая ее последовательно с приемником энергии. При нарастании тока в маг-

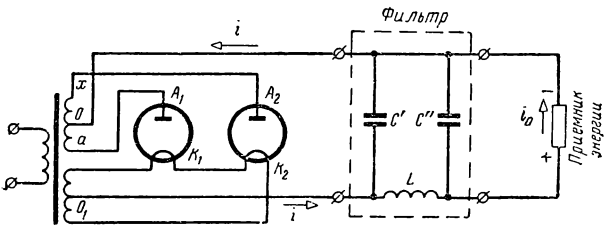


Рис. 13-5. Схема двухполупериодного выпрямления при помощи кенотронов.

нитном поле катушки запасается энергия. При уменьшении тока э. д. с. самоиндукции поддерживает ток того же направления.

При необходимости получить ток с наименьшими пульсациями применяют сглаживающий фильтр, состоящий из катушки и конденсатора или из катушки и двух конденсаторов (рис. 13-5). В схеме двухполупериодного выпрямления двумя кенотронами (рис. 13-5), которые можно заменить одним кенотроном с двумя анодами, аноды соединены с зажимами вторичной обмотки трансформатора, средняя точка которой служит минусом цепи. Плюсом цепи является средняя точка обмотки накала, питающая катоды кенотронов. В течение одного полупериода напряжения u_{ax} ток идет по пути *a*, A_1, K_1, O_1, *фильтр*, *приемник энергии*, *O*, *a*, т. е. через один кенотрон. В течение второго полупериода — по пути *x*, A_2, K_2, O_1, *фильтр*, *приемник энергии*, *O*, *x*, т. е. ток идет через второй кенотрон. Кривая тока $i_п$ приемника при двухполупериодном выпрямлении без применения фильтра показана на рис. 13-6. Применение

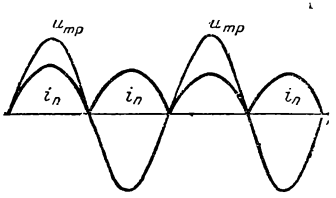


Рис. 13-6. Кривые тока при двухполупериодном выпрямлении без фильтра.

фильтра дает возможность получить в приемнике ток с ничтожными пульсациями.

В трехфазном выпрямителе (рис. 13-7) через каждый кенотрон ток проходит только в течение $^1/_3$ части периода

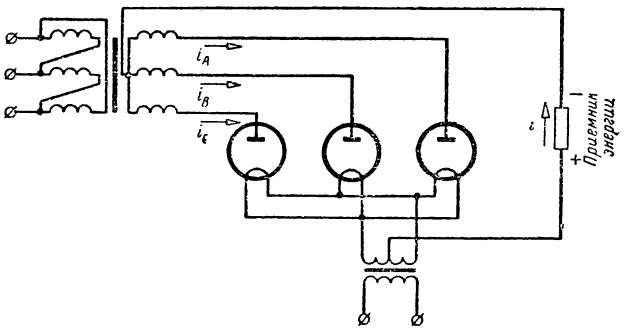


Рис. 13-7. Схема трехфазного выпрямителя.

(рис. 13-8), так как соединенные между собой катоды кенотронов имеют один потенциал, а ток проходит только через тот кенотрон, анод которого имеет более высокий потенциал (рис. 13-8). Выпрямленный ток трехфазного выпрямителя имеет значительно меньшие пульсации, чем при двухполупериодном выпрямлении переменного тока — это большое преимущество трехфазного выпрямителя.

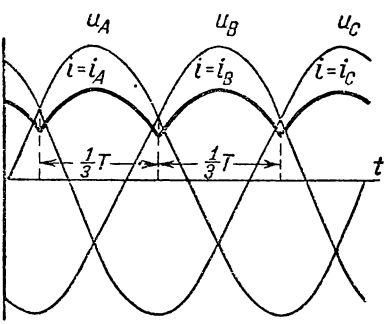


Рис. 13-8. Кривые напряжений и токов в цепи на рис. 13-7.

Для всякого двухполупериодного выпрямителя без фильтра (пренебрегая падением напряжения в нем) выпрямленное напряжение является средним за полупериод значением переменного напряжения. При амплитуде анодного напряжения $U_м = \frac{1}{2} U_{ахм}$ (рис. 13-5) среднее значение

$$U_{ср} = U_{пост} = \frac{2}{\pi} U_м = 0{,}637 U_м.$$

Действующее значение выпрямленного напряжения такое же, как у синусоидального:

$$U = \frac{U_м}{\sqrt{2}} = 0{,}707U_м.$$

Таким образом, для двухполупериодного выпрямителя

$$\frac{U_{пост}}{U} = \frac{U_{ср}}{U} = \frac{0{,}637U_м}{0{,}707U_м} = \frac{1}{1{,}11} = 0{,}9;$$

для трехфазного выпрямителя

$$\frac{U_{пост}}{U_{фази}} = 1{,}17,$$

где $U_{фази}$ — действующее значение фазного напряжения трансформатора (рис. 13-7).

13-3. ИОННЫЕ ВЕНТИЛИ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

а) Газотрон

Газотрон представляет собой ионный прибор. Стеклянный или металлический баллон его, после создания в нем вакуума, заполняется парами ртути или инертным газом при давлении 0,1—0,5 *мм рт. ст.* Газотрон имеет два электрода (рис. 13-9). Анод выполняется из никеля или графита, катод — из вольфрама, покрытого слоем оксида. В мощных газотронах катод помещается внутри цилиндрического экрана, уменьшающего тепловые потери.

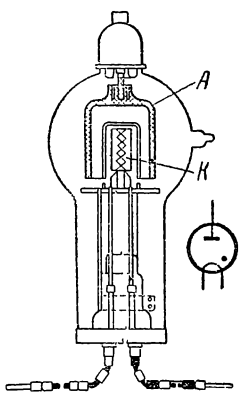


Рис. 13-9. Газотрон и его условное обозначение.

Катод питается от трансформатора накала. Напряжение накала должно быть не более 5 *в*, так как при большем напряжении, малом потенциале ионизации (для ртути около 10 *в*) может возникнуть дуга между концами катода. Таким образом, ток накала получается большим, от нескольких ампер до нескольких десятков ампер, большим будет и время разогрева катода.

При увеличении анодного напряжения от нуля в газотроне сначала возникает только небольшой электронный

ток, так как электроны в слабом электрическом поле между катодом и анодом имеют скорости, недостаточные для ионизации газа. Этому режиму работы соответствует участок *ОА* вольт-амперной характеристики газотрона (рис. 13-10). Если повысить анодное напряжение до величины, несколько превышающей потенциал ионизации газа, то электроны, покинувшие катод, под действием электрического поля получат скорости, достаточные для возбуждения и ионизации газа или паров ртути. Таким образом, в приборе начнется процесс ионизации газа, образование плазмы и возникнет дуговой разряд, чему соответствует точка *А* характеристики газотрона.

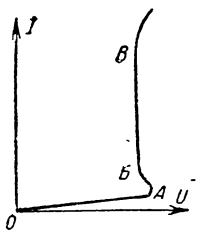


Рис. 13-10. Вольт-амперная характеристика газотрона.

Положительные ионы, полученные при ионизации газа, компенсируют объемный отрицательный заряд вблизи катода, вследствие чего несколько увеличивается электронная эмиссия.

Увеличение тока при уменьшении сопротивления анодной цепи вследствие изменения нагрузки или при увеличении напряжения источника питания почти не влияет на величину падения напряжения между анодом и катодом.

Рабочему режиму газотрона соответствует участок *БВ* его вольт-амперной характеристики. Дальнейшее повышение напряжения и тока (за точкой *В*) недопустимо, так как может вызвать гибель газотрона.

Преимущество газотрона перед вакуумным диодом заключается в меньшем падении напряжения в нем, вследствие чего выпрямители с газотронами имеют более высокий к. п. д.

Как уже отмечалось, газотрон требует большего времени для нагрева катода до рабочей температуры, которая должна быть получена до включения анодного напряжения во избежание потери эмиссии катодом.

Выпрямители с газотронами имеют те же схемы, что и с вакуумными диодами, только на входных зажимах фильтра не должно быть конденсатора (*С'* на рис. 13-5), так как в противном случае зарядный ток конденсатора может вызвать потерю эмиссии катода, т. е. выход газотрона из строя.

б) *Тиратрон*

Тиратрон отличается от газотрона наличием третьего электрода — с е т к и (рис. 13-11), которая играет роль двери, закрывающей или открывающей путь для анодного тока. Катод тиратрона окружен металлическим экраном, верхнее отверстие которого закрыто сеткой, имеющей форму диска с отверстиями. Экран исключает возможность возникновения электрического поля между анодом и катодом помимо сетки.

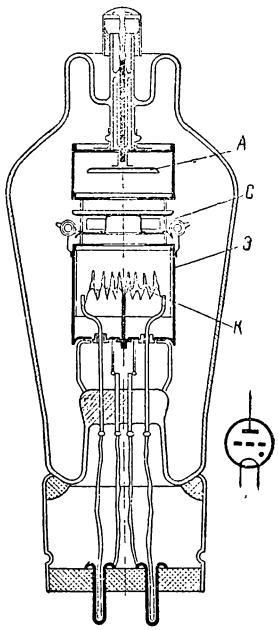


Рис. 13-11. Тиратрон и его условное обозначение.
A — анод; *K* — катод; *C* — сетка; *Э* — экран.

Если сообщить сетке отрицательный потенциал по отношению к катоду, то электрическое поле между сеткой и катодом будет направлено противоположно основному полю тиратрона и движение электронов от катода к аноду замедлится. Таким образом, для каждого значения анодного напряжения существуют такие значения отрицательного потенциала сетки, при которых электроны движутся со скоростью, недостаточной для ионизации газа или паров ртути. Уменьшим отрицательный потенциал сетки до некоторого критического значения, тогда скорости движения электронов станут достаточными для ионизации газа и, следовательно, произойдет зажигание дуги и образование плазмы. При горящей дуге сетка покрыта слоем положительных ионов, нейтрализующих отрицательный заряд сетки, и она перестает влиять на анодный ток. Поэтому для гашения дуги необходимо уменьшить анодное напряжение до значения, близкого к нулю.

При неизменном напряжении между сеткой и катодом u_c зажигание дуги происходит при некотором анодном напряжении u_a, следовательно, изменением напряжения на сетке можно регулировать величину анодного напряжения $u_з$, при котором зажигается тиратрон.

Кривая зависимости $u_з$ от напряжения на сетке $u_с$ называется пусковой характеристикой тиратрона (рис. 13-12). При определенном напряжении на сетке при повышении анодного напряжения зажигание может произойти при напряжении, лежащем в границах от $u_{з.мин}$ до $u_{з.макс}$, так как напряжение зажигания зависит от давления в колбе, температуры окружающей среды, сопротивления цепи сетки, тока накала и т. д. Поэтому вместо пусковой характеристики обычно дают пусковую область, ограниченную кривыми $u_{з.мин}$ и $u_{з.макс}$ (рис. 13-12).

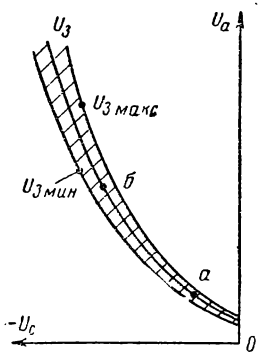


Рис. 13-12. Пусковая характеристика и пусковая область тиратрона.

При работе тиратрона в цепи выпрямителя он в течение каждого периода 1 раз зажигается при положительном анодном напряжении и 1 раз гаснет при анодном напряжении, близком к нулю. Подведем к сетке переменное напряжение $u_с$ той же частоты, что и анодное напряжение $u_а$, но сдвинутое относительно последнего по фазе на угол ψ_1 (рис. 13-13, *а*). Зажигание произойдет, когда отрицательное сеточное напряжение уменьшится, а анодное увеличится, так что оба напряжения будут соответствовать точке *а* (рис. 13-12), лежащей на пусковой характеристике.

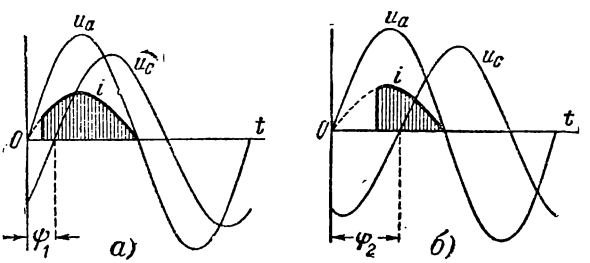


Рис. 13-13. Кривые напряжения и тока тиратрона при различных углах сдвига между анодным и сеточным напряжением.

Изменив фазу сеточного напряжения, можно изменить момент зажигания тиратрона (точка *б* на рис. 13-12). Таким

образом, можно регулировать продолжительность прохождения анодного тока в течение периода, т. е. регулировать среднее значение тока и напряжения (рис. 13-13, *б*).

Тиратроны применяются в цепях переменного тока с частотой не более 1—10 *кгц*, так как при большей частоте заряд у сетки не успевает рассасываться и управление тиратроном становится невозможным.

Тиратроны применяются в выпрямителях, преобразователях постоянного тока в переменный, автоматике и телемеханике и электросварочных установках.

13-4. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

а) Собственная электропроводность

Полупроводники — это материалы, занимающие промежуточное положение между проводниками и непроводниками. Удельное сопротивление проводников лежит в границах $0{,}017 \div 1{,}4$ *ом* $\cdot$ *мм*^{2}/*м*; удельное сопротивление полупроводников составляет $10^2 \div 10^{14}$ *ом* $\cdot$ *мм*^{2}/*м*.

Для полупроводников характерна сильная зависимость проводимости их от температуры, напряженности электрического и магнитного поля, освещенности, сжатия и т. д.

В электротехнике наиболее широкое применение получили: германий, кремний, селен, закись меди и др.

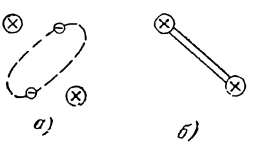


Рис. 13-14. Ковалентная связь атомов.

Химическую связь двух соседних атомов, обусловленную образованием общей пары электронов, вращающихся по одной орбите (рис. 13-14, *а*), называют парноэлектронной или ковалентной. Она условно изображается двумя линиями, соединяющими атомы (рис. 13-14, *б*).

Германий принадлежит к элементам четвертой группы периодической системы элементов Менделеева. Следовательно, он имеет на внешней орбите четыре валентных электрона. В кристалле германия каждый атом образует парноэлектронные связи с четырьмя соседними атомами (рис. 13-15).

При температуре, близкой к абсолютному нулю, в кристалле германия при отсутствии примесей все валентные

электроны атомов взаимно связаны, свободных электронов нет, следовательно, кристалл не обладает проводимостью. При повышении температуры увеличивается энергия электронов, что приводит к частичному нарушению ковалентных связей и появлению свободных электронов. Германий уже при комнатной температуре становится полупроводником.

Под действием внешнего электрического поля свободные электроны перемещаются, обусловливая электронную проводимость (*n*-проводимость).

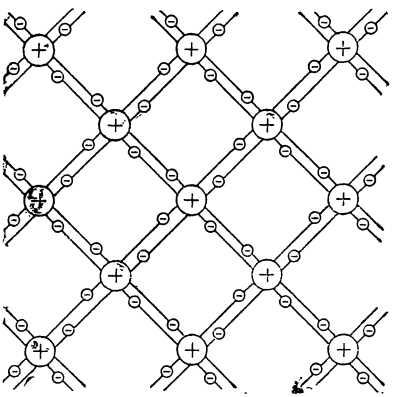


Рис. 13-15. Схема парноэлектронных связей в кристаллической решетке германия.

В момент образования свободного электрона в ковалентных связях образуется свободное место — «электронная дырка».

При наличии дырки какой-либо из электронов связи может занять место дырки и нормальная связь в этом месте восстанавливается, но разрушается в другом месте, эту новую дырку может занять еще какой-либо электрон и т. д. Под действием внешнего электрического поля происходит перемещение дырок в направлении поля.

Перемещение дырок эквивалентно току положительных зарядов, величина которых равна зарядам электронов. Этот процесс называется дырочной проводимостью (*p*-проводимость).

Таким образом, проводимость полупроводника складывается из электронной и дырочной проводимостей.

При нарушении парноэлектронных связей в кристалле одновременно возникает одинаковое число свободных электронов и дырок. Если, с одной стороны, с повышением температуры происходит образование пар электрон-дырка, то, с другой стороны, происходит их частичное воссоединение. При каждой температуре в единице объема полупроводника число пар в среднем остается постоянным. Электропровод-

ность полупроводников, лишенных примесей, называется собственной электропроводностью полупроводника и по величине несоизмеримо меньше, чем металлов.

б) Примесная электропроводность

Свойства полупроводника можно изменить, внеся в него ничтожное количество примеси. Вводя в кристалл полупроводника атомы других элементов, можно получить в кристалле преобладание свободных электронов над дырками, или, наоборот, преобладание дырок над свободными электронами.

Например, при замещении в кристаллической решетке атома германия атомом мышьяка, имеющим пять валентных электронов, четыре электрона мышьяка образуют заполненные связи с соседними атомами германия, а пятый электрон, слабо связанный с атомом мышьяка, превратится в свободный. Потеряв пятый валентный электрон, атом мышьяка становится положительным ионом. За счет этих электронов, отданных примесью, возрастает проводимость примесного полупроводника.

При замещении атома германия атомом индия, имеющим три валентных электрона, они вступают в ковалентную связь с тремя атомами германия, а связи с четвертым атомом германия будут отсутствовать, так как у индия не хватает четвертого электрона. Восстановление всех связей возможно, если недостающий четвертый электрон получается от ближайшего атома германия. Но в этом случае на месте электрона, покинувшего атом германия, появится дырка, которая будет заполняться электроном из соседнего атома германия. Процесс последовательного заполнения свободной связи равноценен движению дырок в полупроводнике. Таким образом, примесь индия обеспечивает дырочную проводимость кристалла германия.

Полупроводники с преобладанием электронной проводимости называются полупроводниками типа n (от латинского слова negative — отрицательный), а полупроводники с преобладанием дырочной проводимости — типа p (от латинского positive — положительный). Носители заряда, определяющие собой род проводимости в примесном полупроводнике, называются основными (электроны в n полупроводнике или дырки в p полупроводнике), а носители заряда противоположного знака — неосновными.

В зависимости от процентного содержания примеси электропроводность примесного полупроводника возрастает по сравнению с чистым полупроводником в десятки и сотни тысяч раз. Например, если в нормальных условиях в 1 $см^3$ чистого германия содержится примерно 10^{22} атомов и 10^{13} электронов проводимости и дырок, то примесь мышьяка в количестве 0,001% вызовет появление в том же объеме дополнительно 10^{17} электронов проводимости, которые обеспечат увеличение электронной проводимости примерно в 10 000 раз.

13-5. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

а) Полупроводниковый вентиль

Полупроводниковый вентиль представляет собой контактное соединение двух полупроводников, один из которых с электронной проводимостью, а другой — с дырочной (рис. 13-16), например германий типа *p* и германий типа *n*.

Вследствие большей концентрации электронов в полупроводнике *n* по сравнению с полупроводником *p* будет происходить диффузия электронов из первого полупроводника во второй. Аналогично будет происходить диффузия дырок в полупроводник *n*.

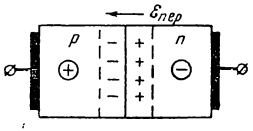


Рис. 13-16. Полупроводниковый вентиль.

В пограничном слое полупроводника *n* возникнет положительный заряд, в пограничном слое полупроводника *p* — отрицательный заряд. Между разноименными заряженными слоями образуется электрическое поле напряженностью $\mathscr{E}_{пер}$, препятствующее дальнейшей диффузии, которая прекратится при равенстве сил электрического поля и сил, вызывающих диффузию. Тонкий пограничный слой, обедненный основными носителями зарядов, обладающий большим сопротивлением, называют запирающим слоем или *p-n* переходом.

Соединив положительный зажим источника питания с металлическим электродом полупроводника *p*, а отрицательный зажим — с электродом полупроводника *n*, получим внешнее электрическое поле, направленное навстречу полю *p-n* перехода, под действием которого электроны и дырки

будут двигаться навстречу друг другу (рис. 13-17). При таком движении электронов и дырок число основных носителей заряда в переходном слое возрастает, толщина переходного слоя уменьшается, а сопротивление его падает. Таким образом, в цепи установится ток, называемый прямым ($I_{пр}$), который будет значительным даже при относительно небольшом напряжении.

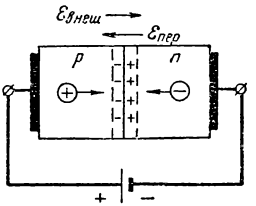


Рис. 13-17. Включение вентиля в прямом направлении.

Присоединив к вентилю источник питания в обратном направлении (рис. 13-18), получим внешнее поле одного направления с полем p-n перехода и, следовательно, усиливающим его. Теперь поле еще больше будет препятствовать прохождению основных носителей зарядов через запирающий слой. Кроме того, внешнее поле вызовет движение электронов в n полупроводнике и дырок в p полупроводнике в стороны, противоположные от запирающего слоя. Это повлечет за собой увеличение толщины запирающего слоя и возрастание его сопротивления. Ток, называемый в этом случае обратным $I_{обр}$, весьма мал и во многих случаях практики может считаться равным нулю.

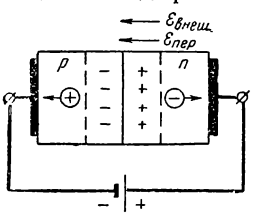


Рис. 13-18. Включение вентиля в обратном направлении.

Таким образом, контактное соединение двух полупроводников с разными проводимостями обладает явно выраженной односторонней проводимостью, т. е. является вентилем.

Отношение токов при одинаковых напряжениях

$$k_в = \frac{I_{пр}}{I_{обр}}$$

называется коэффициентом выпрямления.

б) Меднозакисный вентиль

Меднозакисный вентиль (рис. 13-19) состоит из медного диска *1*, на который наносится слой закиси меди *2*. К последнему прилегает для получения хорошего контакта свинцовый диск *3*, а за ним расположен тонкий большого диаметра

латунный диск *4* — радиаторный, предназначенный для отвода тепла.

Слой закиси меди (CuO_2) получается при термической обработке меди в атмосфере кислорода. Наружный слой закиси меди *2'*, полученный при избытке кислорода, обладает *p* проводимостью. Слой закиси 2'', прилегающий к медной

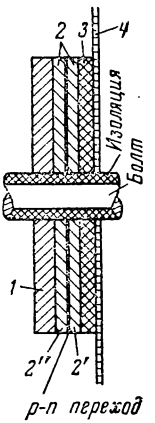


Рис. 13-19. Устройство меднозакисного вентиля.

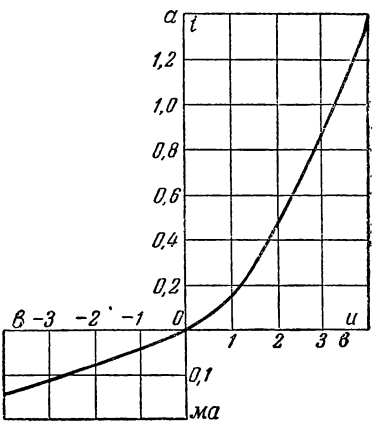


Рис. 13-20. Вольт-амперная характеристика меднозакисного вентиля.

шайбе, полученный при недостатке кислорода, обладает *n* проводимостью. Между двумя слоями закиси меди возникает *p-n* переход.

Допустимое напряжение на вентиле не более 8—10 *в*, так как при обратном напряжении 20—30 *в* он пробивается. Для выпрямления при больших напряжениях несколько вентилей монтируются на болте, образуя столбик выпрямителя. Для улучшения охлаждения устанавливаются радиаторные шайбы с тем, чтобы температура не поднималась выше 55°, так как иначе вентиль может потерять вентильные свойства. Вольт-амперная характеристика вентиля дана на рис. 13-20.

в) Селеновый вентиль

Этот вентиль (рис. 13-21) состоит из алюминиевого или стального диска *1*, покрытого с одной стороны полупроводящим слоем кристаллического селена *2*, обладающего дырочн-

ной проводимостью, который служит одним электродом. Другим электродом *4* служит нанесенный на селен слой сплава олова, кадмия и висмута, к которому прилегает латунная пружинящая шайба *5*. Электроды отделены друг от друга запирающим слоем *3*.

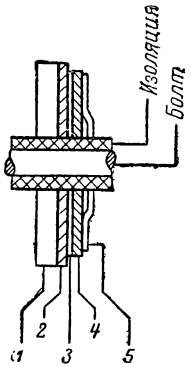


Рис. 13-21. Схема устройства селенового вентиля.

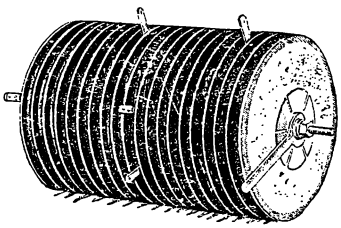


Рис. 13-22. Столбик селенового вентиля.

Допустимое напряжение на селеновый вентиль составляет 20—40 *в*, при обратном напряжении 60—80 *в* вентиль пробивается.

На рис. 13-22 показан столбик селенового вентиля, а на рис. 13-23 — его вольт-амперная характеристика.

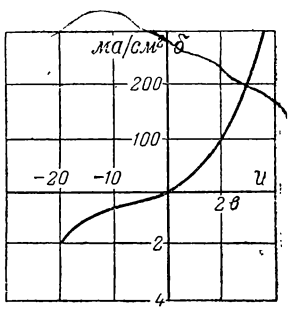


Рис. 13-23. Вольт-амперная характеристика селенового вентиля.

г) Германиевые и кремниевые вентили

В германиевых и кремниевых диодах используются явления, происходящие в *p-n* переходах между кристаллом германия или кремния и металлом.

Эти вентили изготовляются точечными и плоскостными.

Точечный германиевый диод типа Д1Г (рис. 13-24) состоит из стеклянного (или металлостеклянного) баллона диаметром около 3 *мм* и длиной 10 *мм*, в который впаяны два проволочных вывода. На конце одного из них укреплен кристалл германия *1* с *n* проводимостью, на конце

другого — тонкая заостренная проволочка индия *2*. Запирающий слой (*р-п* переход) образуется в толще *п* кристалла германия под заостренным концом проволочки (рис. 13-24,*а*) при формовке — пропускании импульсов тока, под действием которых атомы индия диффундируют в кристалл германия, образуя в кристалле полусферическую область с дырочной проводимостью. На границе этой полусферы и возникает *р-п* переход.

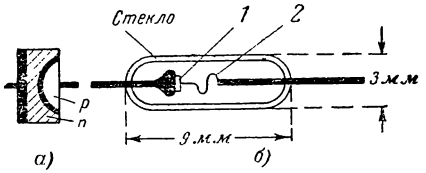


Рис. 13-24. Германиевый точечный вентиль.

Максимальный выпрямленный ток этого вентиля 16 *ма*, максимально допустимое обратное напряжение 50 *в*. Вольт-амперная характеристика вентиля дана на рис. 13-25.

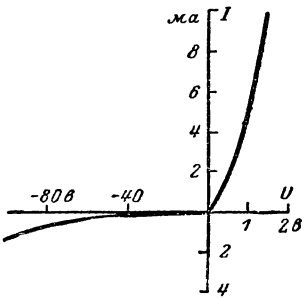


Рис. 13-25. Вольт-амперная характеристика точечного германиевого вентиля.

Плоскостный вентиль состоит из пластины германия *1* (рис. 13-26) с примесью сурьмы или мышьяка, обладающей электронной проводимостью, и индиевой пластины *2*.

При изготовлении индиевая пластина, расположенная на поверхности германия, нагревается до температуры плавления индия. При этом атомы индия диффундируют в германий, образуя область

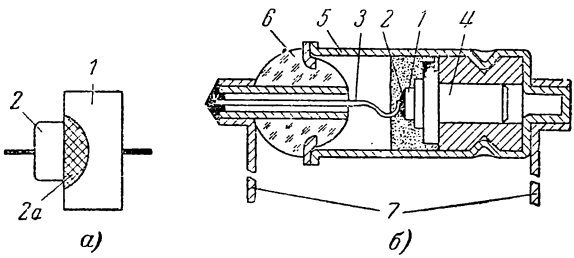


Рис. 13-26. Германиевый плоскостной вентиль типа Д-7.

2а с дырочной проводимостью. На границе создается переход типа *р-п*.

На рис. 13-26, *6* показано устройство одного из плоскостных германиевых вентилей типа Д-7.

В металлическом корпусе *5* длиной около 20 *мм* укреплен токосниматель *4* с расположенным на конце кристаллом германия *1*. Электрод *2* из индия соединен с одним из выводов *7* проводником *3*, проходящим через изолятор *6*.

Максимальное допустимое обратное напряжение 50 *в*, выпрямленный ток 300 *ма*. На рис. 13-27 дана вольт-амперная характеристика вентиля.

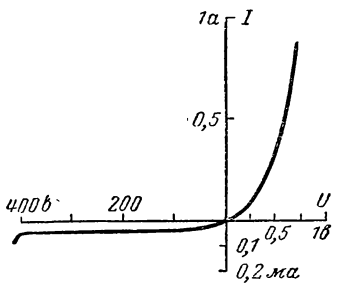


Рис. 13-27. Вольт-амперная характеристика плоскостного вентиля.

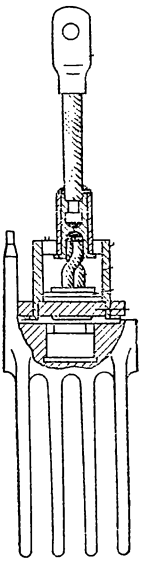


Рис. 13-28. Кремниевый диод типа ВК-100.

Силовые германиевые и кремниевые вентили изготовляются на номинальные токи до 1 000 *а*.

На рис. 13-28 показан кремниевый диод типа ВК-100 с воздушным охлаждением на номинальный ток 100 *а*.

Рис. 13-29. Однополупериодное выпрямление.

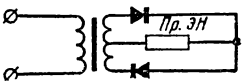


Рис. 13-30. Двухполупериодное выпрямление.

На рис. 13-29 и 13-30 даны схемы одно- и двухполупериодного выпрямления переменного тока, аналогичные схемам с ламповыми вентилями (рис. 13-3 и 13-5). Мостовая двухполупериодная схема показана на рис. 13-31. Для

увеличения выпрямленного напряжения и тока в каждую из ветвей схемы можно включать по нескольку вентилей, соединенных между собой последовательно-параллельно или группами.

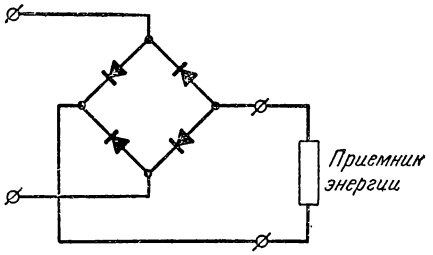


Рис. 13-31. Мостовая схема выпрямителя.

Коэффициент полезного действия меднозакисных выпрямителей составляет 50—60%, селеновых—80—90%, германиевых и кремниевых более 90%.

Выпрямители нашли самое широкое применение для питания электролитических ванн и зарядки аккумуляторных батарей, для питания электродвигателей и аппаратов в измерительной технике, в автоматике, радиотехнике и т. д.

13-6. ВЫПРЯМИТЕЛИ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ — РТУТНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Ртутные выпрямители по конструкции делятся на стеклянные и металлические. По числу фаз — на одно- и трехфазные, по числу анодов — на одно-, двух-, трех- и шестианодные.

Простейший однофазный двухполупериодный ртутный вентиль имеет стеклянную колбу *Б* (рис. 13-32) с рукавами, в которой создан вакуум. Аноды A_1 и A_2, выполненные из графита, соединены с вторичной обмоткой трансформатора *Т*. Нулевая точка этой обмотки является отрицательным зажимом цепи выпрямленного тока. Катодом *К* является ртуть на дне колбы. Ртуть в нижнем отростке колбы служит анодом зажигания A_3.

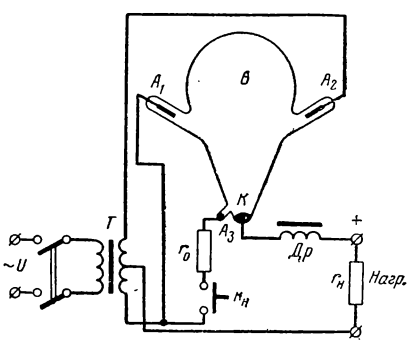


Рис. 13-32. Однофазный ртутный выпрямитель.

Для пуска выпрямителя включают переменное напряжение, нажимают кнопку $k_н$ и осторожно наклоняют колбу так, чтобы ртуть катода и анода зажигания соединилась. Под действием э. д. с. нижней половины вторичной обмотки трансформатора будет проходить ток в сопротивлении r_0 и ртутном мостике между анодом зажигания и катодом.

При возвращении колбы в вертикальное положение ртутный мостик разрывается, в разрыве появляется дуга и катод начинает выделять свободные электроны. Под действием электрического поля свободные электроны от катода направляются к тому из анодов, который в данный момент времени имеет положительный потенциал по отношению к катоду. При своем движении электроны ионизируют пары ртути и между катодом и анодом возникает дуговой разряд. После этого кнопка $k_н$ размыкается.

При дуге на ртути катода образуется светлое катодное пятно, сопровождающееся испарением ртути и интенсивным выделением электронов. Для поддержания пятна, а следовательно, и дуги анодный ток не должен падать ниже 4—5 *а*. Дроссель *Др* (рис. 13-32) при уменьшении анодного напряжения ниже критического, на одном из анодов, поддерживает ток, необходимый для горения дуги до тех пор, пока он не начнет проходить через другой анод при изменении знака, приложенного к анодам напряжения. Таким образом, происходит непрерывное горение дуги и прохождение тока в цепи нагрузки $r_н$.

При изменении знака напряжения между анодом и катодом, т. е. при обратном напряжении, между электродами возникает незначительный (несколько миллиампер) ток обратного направления.

Падение напряжения в выпрямителе обычно невелико (20—25) *в*.

В более совершенных ртутных вентилях наряду с рабочими анодами имеются вспомогательные аноды зажигания (рис. 13-33), которые питаются от вспомогательного трансформатора и предназначены для поддержания катодного пятна, независимо от тока в цепи нагрузки.

Трехфазный ртутный выпрямитель (рис. 13-33) отличается от однофазного наличием трех рабочих анодов. Они присоединены к трем вторичным обмоткам трансформатора, соединенным звездой, нулевая точка которой служит минусом цепи нагрузки. Ток проходит через каждый рабочий анод только в течение $^1/_3$ части периода.

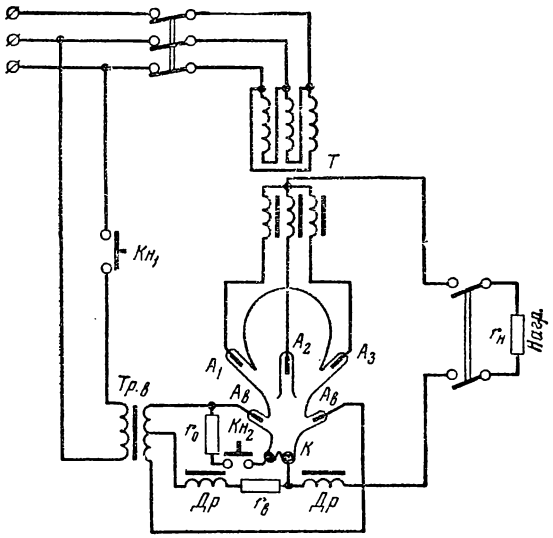


Рис. 13-33. Трехфазный ртутный выпрямитель.

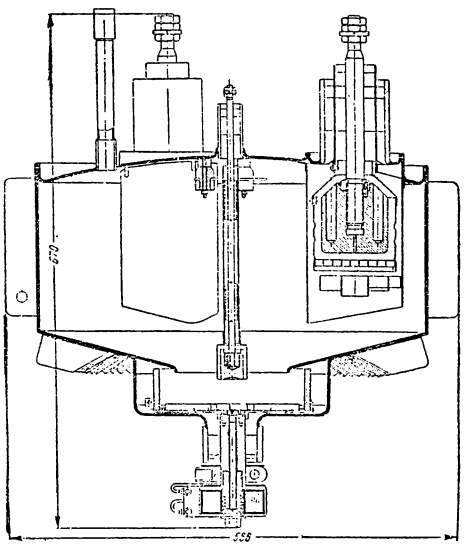


Рис. 13-34. Разрез треханодного безнасосного ртутного вентиля.

Стеклянные ртутные выпрямители изготовляются на номинальные токи до 500 *а* при напряжении до 600 *в*.

Наряду со стеклянными ртутными вентилями изготовляются многоанодные металлические вентили. На рис. 13-34 показано устройство металлического треханодного вентиля с воздушным охлаждением на номинальный ток 200 *а* и номинальное напряжение 250 *в*.

В типовых мощных выпрямительных установках применяются комплекты из нескольких однофазных металлических вентилей на номинальные токи до 10—12 *ка*.

Устройство одноанодного вентиля показано на рис. 13-35.

Корпус вентиля состоит из металлического цилиндра, в стенках которого расположены каналы для охлаждающей воды. На крышке крепятся: главный графитовый анод A, аноды возбуждения $A_в$, анод зажигания $A_з$ и вводы для сетки C. Катод K состоит из донницы с ртутью, расположенной в нижнем фланце, изолированном от корпуса.

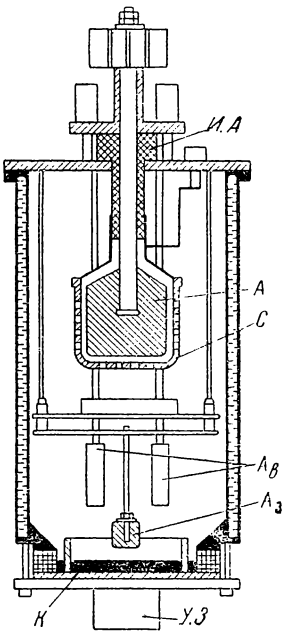


Рис. 13-35. Разрез одноанодного ртутного вентиля.

A — анод; K — катод; C — сетка; $A_в$ — анод возбуждения; $A_з$ — анод зажигания; *УЗ* — устройство для зажигания; *ИА* — изоляция анода.

Устройство для зажигания представляет собой стакан с расположенным в нем сердечником электромагнита. Сердечник нормально удерживается пружиной в верхнем положении. При импульсе тока в катушке электромагнита сердечник опускается и вытесняет ртуть из стакана, вследствие чего через отверстие в доннице выбрасывается струя ртути. Эта струя замыкает цепь между катодом и анодом зажигания. При разрыве струи зажигается дуга.

Сетка в одноанодном ртутном вентиле, как и в тиратроне, дает возможность регулировать момент зажигания дуги.

Вентильные комплекты, состоящие обычно из шести или двенадцати вентилей, монтируются на одной раме с насосной

установкой. Последняя применяется для поддержания в вентилях вакуума. Например, комплект типа РМНВ-500×12 состоит из 12 вентилей на номинальный выпрямленный ток 6 *ка* и номинальное выпрямленное напряжение 600 *в*.

Ртутные выпрямители применяются в установках для электролиза, для питания станков, механизмов, мощных кранов и электрифицированных железных дорог.

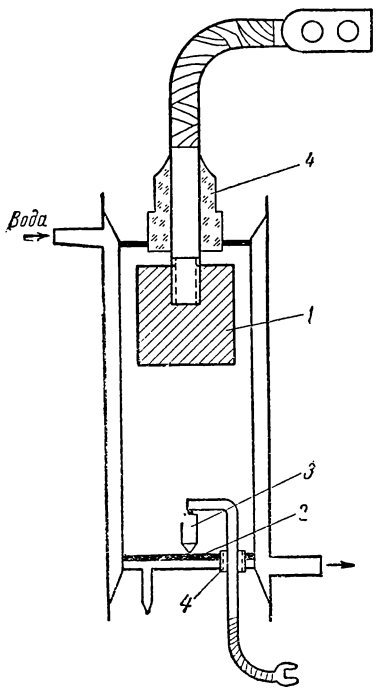


Рис. 13-36. Игнитрон.

1 — анод; *2* — ртутный катод; *3* — зажигатель; *4* — изолятор.

13-7. ИГНИТРОН

Игнитрон представляет собой разновидность одноанодного ртутного вентиля.

Корпус металлического игнитрона (рис. 13-36) представляет собой стальной цилиндр, с расположенными внутри стенок его каналами для охлаждающей воды. В корпусе расположены: угольный анод *1*, ртутный катод *2* и электрод-зажигатель *3*, заменяющий аноды возбуждения и зажигания в одноанодном ртутном вентиле.

Зажигатель представляет собой заостренный стержень из карборунда или другого полупроводникового материала. Карборунд не смачивается ртутью и вследствие этого при импульсе тока через зажигатель на границе соприкосновения его с ртутью возникают небольшие искры, быстро переходящие в дуговой разряд между катодом и анодом.

Изменяя момент подачи импульса в цепь зажигателя, можно изменять момент зажигания дуги аналогично тиратрону.

Падение напряжения в игнитроне невелико 15—20 *в*.

Стеклянные игнитроны изготовляются на токи до 100 *а*, металлические — до 300—500 *а* и выше.

Игнитроны находят применение в мощных выпрямительных устройствах, в инверторах, электросварочных установках и т. д.

13-8. ИНВЕРТОР

Инвертором называется ионный преобразователь постоянного тока в переменный.

Одна из простейших схем инвертора с двумя тиратронами показана на рис. 13-37.

Положительный зажим источника питания постоянного тока через дроссель L соединен с нулевой точкой первичной обмотки выходного трансформатора T, а концы этой обмотки — с зажимами конденсатора C и с анодами тиратронов. Отрицательный зажим того же источника соединен с катодами тиратронов.

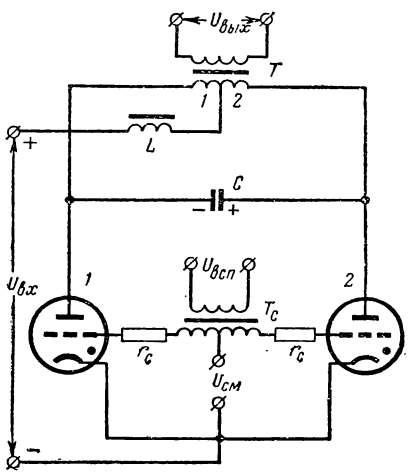


Рис. 13-37. Схема инвертора.

Цепь сеток тиратронов питается через сеточный трансформатор T_c от вспомогательного источника переменного тока. Нейтральная точка вторичной обмотки этого трансформатора через источник напряжения сеточного смещения $U_{см}$ включена в цепь катодов тиратронов. Вследствие этого напряжения на сетках тиратронов изменяются в противофазе и тиратроны зажигаются поочередно со сдвигом на половину периода.

Прохождение тока через первый тиратрон и левую половину (*1*) первичной обмотки выходного трансформатора T сопровождается индуктированием в правой половине (*2*) той же обмотки такой же э. д. с., как и в левой. Таким образом, напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора T равно удвоенному напряжению на ее левой половине.

Обкладка конденсатора C, соединенная с горящим тиратроном, заряжается отрицательно, а другая — положительно. В момент зажигания второго тиратрона конденсатор разрядится через тиратроны и разрядный ток компенсирует ток первого тиратрона. Таким образом, ток в нем уменьшается и тиратрон погаснет, а ток во втором тиратроне нарастает до некоторой определенной величины. При токе во втором тиратроне конденсатор перезарядится.

Таким образом, в обеих половинах первичной обмотки выходного трансформатора поочередно будет проходить ток. Вследствие этого во вторичной обмотке трансформатора будет индуктироваться переменная э. д. с., имеющая ту же частоту, что и источник переменного тока, питающий сеточный трансформатор.

Форма кривой тока во внешней цепи выходного трансформатора зависит от индуктивности дросселя L, параметров трансформатора T, емкости конденсатора C и характера нагрузки.

Если напряжение $U_{вст}$, подводимое к первичной обмотке сеточного трансформатора, получено не от внешнего источника, а от выходного трансформатора, то инвертор называется *самовозбуждающимся*.

13-9. ТРЕХЭЛЕКТРОДНАЯ ЛАМПА

Трехэлектродная лампа, или *триод* (рис. 13-38), отличается от двухэлектродной лампы наличием третьего электрода, называемого управляющей *сеткой*, которая имеет форму спирали, расположенной между катодом и анодом.

Назначение сетки — управлять электронным потоком в лампе между катодом и анодом, а следовательно, и анодным током. Сообщив сетке положительный потенциал относительно катода, между катодом и сеткой создают дополнительное поле одного направления с основным полем лампы. Дополнительное поле уменьшает объемный отрицательный заряд и увеличивает анодный ток лампы. Наоборот, при отрицательном потенциале сетки относительно катода дополнительное поле будет направлено противоположно основному, что вызовет уменьшение анодного тока, который при некотором значении отрицательного потенциала сетки достигнет нулевого значения и лампа будет заперта. Сетка расположена ближе к катоду, чем анод,

поэтому изменение потенциала сетки значительно сильнее влияет на анодный ток, чем анодное напряжение.

График зависимости анодного тока от потенциала сетки относительно катода или, что то же, от сеточного напряжения $I_a = f(U_c)$ при постоянном анодном напряжении называется анодно-сеточной характеристикой лампы (рис. 13-39).

Отношение приращения анодного тока к соответствующему приращению сеточного напряжения при неизменном анодном напряжении называется крутизной характеристики, т. е.

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c}.$$

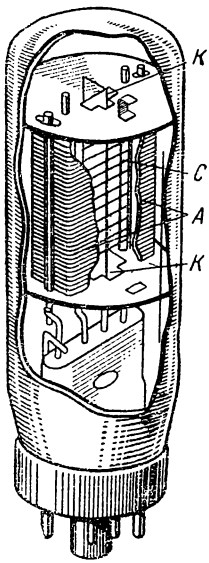
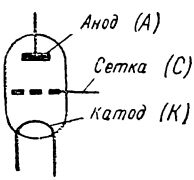


Рис. 13-38. Трехэлектродная лампа, ее условное обозначение.



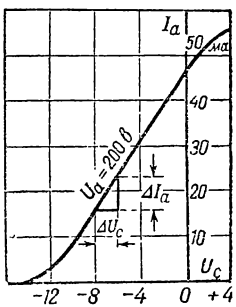


Рис. 13-39. Сеточная характеристика триода.

Отношение приращения анодного напряжения к соответствующему приращению анодного тока при неизменном сеточном напряжении называется внутренним сопротивлением лампы, таким образом,

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}.$$

Произведение внутреннего сопротивления лампы и крутизны характеристики называется статическим коэффициентом усиления, т. е.

$$\mu = R_i S = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}\frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}.$$

Он равен отношению приращения анодного напряжения к приращению сеточного напряжения, при котором анодный ток останется неизменным.

Статический коэффициент усиления показывает, во сколько раз изменение напряжения на сетке сильнее влияет на величину анодного тока по сравнению с изменением анодного напряжения.

Триоды применяются как усилительные и генераторные лампы.

13-10. ЧЕТЫРЕХ- И ПЯТИЭЛЕКТРОДНЫЕ ЛАМПЫ

Четырехэлектродная лампа, называемая тетродом, отличается от триода тем, что между первой сеткой и анодом расположена вторая сетка экранная, на которую обычно подводится положительное неизменное напряжение U_{c2} (рис. 13-40), несколько меньшее или равное анодному.

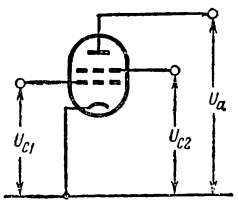


Рис. 13-40. Схема четырехэлектродной лампы.

Экранная сетка применяется для увеличения коэффициента усиления. Она расположена вблизи анода и является электростатическим экраном, ослабляя влияние анода на электрическое поле и на электронный поток лампы, что и приводит к увеличению коэффициента усиления.

При высоком потенциале анода и экранной сетки электроны, пройдя через нее, ударяются об анод и выбивают из него вторичные электроны (динатронный эффект). Если напряжение экранной сетки больше анодного, то вторичные электроны от анода будут двигаться к экранной сетке, вследствие чего уменьшается анодный ток и в анодной характеристике лампы будет провал (рис. 13-41). При анодном напряжении, равном или большем U_{c2}, вторичные электроны вновь возвращаются на анод.

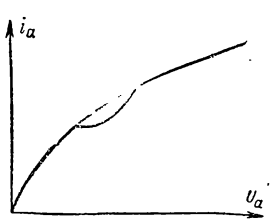


Рис. 13-41. Анодная характеристика тетрода.

Искажение анодной характеристики, вызванное динатронным эффектом, является существенным недостатком тетрода, так как при работе лампы в качестве усилительной искажается форма анодного тока.

Тетроды специальной конструкции, называемые л у ч е в ы м и, не обладают динатронным искажением анодной характеристики.

Обе сетки в лучевом тетроде (рис. 13-42) выполнены с одинаковым числом витков. Витки сеток расположены друг против друга так, что электронный поток лампы делится витками на узкие пучки-лучи. Между ребрами плоского катода и анодом расположены пластины, имеющие потенциал катода, играющие роль экранов и, следовательно, электронный поток лампы сосредоточивается в двух секторах. Вследствие большой плотности электронных потоков в двух секторах в пространстве между экранной сеткой и анодом создается объемный отрицательный заряд, поле которого вынуждает вторичные электроны, покинувшие анод, возвратиться обратно. Таким образом, устраняется влияние динатронного эффекта на анодный ток и на анодную характеристику лампы.

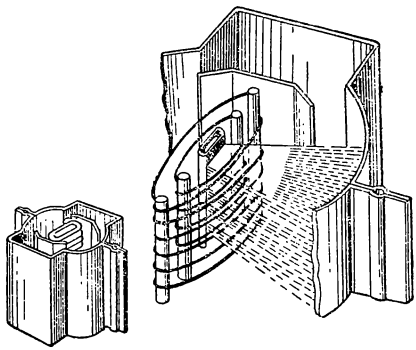


Рис. 13-42. Схема устройства лучевого тетрода.

Пятиэлектродная лампа, называемая п е н т о д о м, отличается от тетрода наличием третьей сетки — защитной или противодинатронной. Защитная сетка расположена между экранной сеткой и анодом и, соединяясь с катодом, имеет нулевой потенциал. Электрическое поле между защитной сеткой и анодом заставляет вторичные электроны, покинувшие анод, возвратиться обратно. Таким образом, анодная характеристика не имеет искажений. Так как влияние анода на излучаемые первичные электроны в пентоде еще слабее, чем в тетроде, то коэффициент усиления пентода больше, чем тетрода, и достигает нескольких тысяч.

13-11. ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Э л е к т р о н н ы м у с и л и т е л е м называется устройство, содержащее одну или несколько электронных ламп, с помощью которого производится усиление

напряжения, мощности и тока за счет энергии источника питания.

В усилителях применяются трех-, четырех- и пятиэлектродные лампы.

Схема простейшего усилителя или усилительного каскада с применением трехэлектродной лампы дана на рис. 13-43.

При отсутствии напряжения $U_{вх}$ на входных зажимах (на зажимах сопротивления r_c) в анодной цепи незапертой лампы будет проходить ток I_{a0}, называемый током покоя или постоянной составляющей анодного тока. На выходных зажимах или на зажимах выходного сопротивления $r_{вых}$ будет постоянная составляющая напряжения $U_{вых} = I_{a0} r_{вых}$.

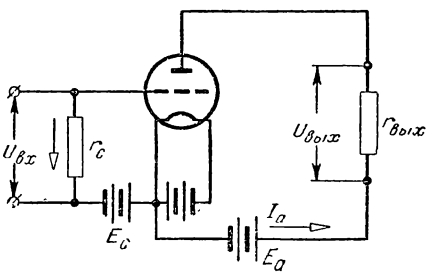


Рис. 13-43. Схема электронного усилителя.

При появлении на входных зажимах напряжения (сигнала) $\Delta U_{вх}$ потенциал сетки увеличится или уменьшится на ту же величину, вследствие чего анодный ток изменится на величину ΔI_a, а напряжение на выходе изменится на величину $\Delta U_{вых} = \Delta I_a r_{вых}$.

Отношение приращения напряжения на выходе к приращению напряжения на входе носит название коэффициента усиления усилителя

$$k = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}} = \mu \frac{r_{вых}}{R_i + r_{вых}} < \mu.$$

Таким образом, процесс усиления заключается в том, что слабое изменение напряжения на входных зажимах вызывает подобное, но в k раз более сильное изменение напряжения на выходных зажимах или электрический сигнал малой мощности, поданный на сетку лампы, воспроизводится значительно более мощным сигналом в выходном сопротивлении.

Чем больше выходное сопротивление по сравнению с сопротивлением лампы R_i, тем меньше отличается коэффициент усиления усилителя от статического коэффициента усиления лампы.

Сеточная характеристика триода (рис. 13-39) снимается при постоянном анодном напряжении $U_а$. При работе лампы в схеме усилителя изменение анодного тока вызывает изменение анодного напряжения и напряжения на нагрузке, так как $U_а = E_а - I_а r_{вых}$. Сеточная характеристика $I_а = f(U_с)$ для этого случая, т. е. при изменяющемся анодном напряжении и неизменных э. д. с. $E_а$ и сопротивлении нагрузки $r_{вых}$, называется р а б о ч е й и л и д и н а м и ч е с к о й характеристикой. Она имеет тот же характер, но меньшую крутизну.

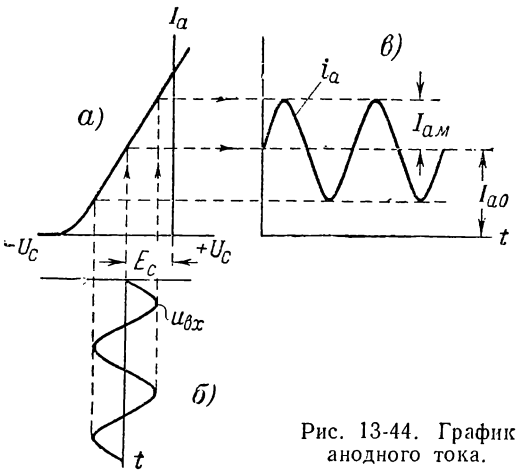


Рис. 13-44. График анодного тока.

На рис. 13-44 по заданной кривой входного напряжения — сигнала $u_{вх}$ и динамической характеристике *а* построен по точкам график анодного тока *в*.

Если между сеткой и катодом лампы будет приложено только одно входное переменное напряжение, то потенциал сетки в течение одного полупериода будет положительным, в течение другого — отрицательным. При положительном потенциале сетки в контуре катод — сопротивление $r_с$ — сетка — катод появится сеточный ток, искажающий сигнал, что недопустимо.

Для получения отрицательного потенциала сетки в течение всего времени работы между сеткой и катодом включают дополнительный источник постоянной э. д. с. $E_с$ — н а п р я ж е н и е с м е щ е н и я (рис. 13-43 и 13-44). В этом случае напряжение на сетке в каждый момент вре-

мени равно алгебраической сумме мгновенного значения входного напряжения $u_{вх}$ и напряжения смещения E_c.

Анодный ток состоит из двух слагающих: тока покоя I_{a0} и переменной $I_{a.м} \sin \omega t$, т. е.

$$i_a = I_{a0} + I_{a.м} \sin \omega t.$$

Величина падения напряжения на выходном сопротивлении, созданная переменной слагающей тока:

$$u_{вых} = r_{вых} I_{a.м} \sin \omega t = U_{вых.м} \sin \omega t$$

представляет усиленное в k раз входное напряжение $u_{вх}$.

Если усиление, полученное одним каскадом, недостаточно, то применяют усилитель с несколькими каскадами.

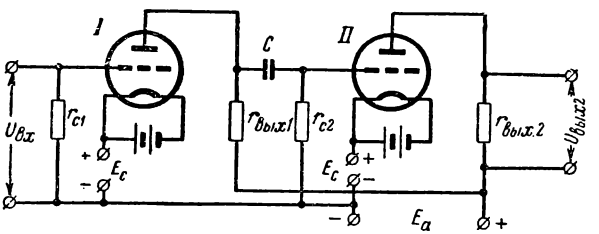


Рис. 13-45. Двухкаскадный усилитель на сопротивлениях.

При этом напряжение на выходном сопротивлении первого каскада будет служить входным напряжением для второго каскада и т. д. Последний каскад обычно служит для получения на выходе достаточной мощности.

Коэффициент усиления усилителя с несколькими каскадами равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов

$$k = k_1 k_2 k_3, \ \ldots, \ k_n.$$

Связь между каскадами можно выполнить различно, например на сопротивлениях или на трансформаторах.

На рис. 13-45 дана схема двухкаскадного усилителя на сопротивлениях.

Здесь входное переменное напряжение $u_{вх}$ вызывает в анодной цепи первой лампы пульсирующий ток. Постоянная слагающая этого анодного тока проходит через выходное сопротивление $r_{вых\,1}$, но не может пройти через сеточное сопротивление r_{c2} второй лампы из-за разделительного кон-

денсатора C. Часть переменной слагающей анодного тока первой лампы, проходящая через конденсатор C и сопротивление r_{c2}, создает на этом сопротивлении напряжение, представляющее собой усиленное первой лампой входное

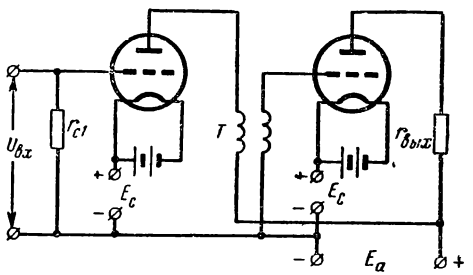


Рис. 13-46. Двухкаскадный усилитель на трансформаторах.

напряжение. Это напряжение подается на сетку второй лампы и усиливается ею до величины $U_{вых\,2}$.

В схеме усилителя на трансформаторах (рис. 13-46) выходное сопротивление первого каскада заменено первичной обмоткой межкаскадного трансформатора, вторичная обмотка которого включена между сеткой и катодом второй лампы. Применение трансформатора с коэффициентом трансформации 3—5 повышает коэффициент усиления.

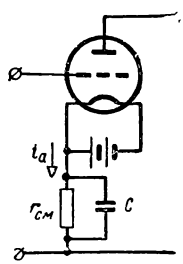


Рис. 13-47. Сеточное смещение при помощи анодного тока.

Напряжение смещения чаще получают не от батареи смещения (рис. 13-43), а используют для этого падение напряжения на сопротивлении $r_{см}$ (рис. 13-47), вызванное прохождением постоянной составляющей тока $I_{a0}r_{см}$. Переменная составляющая анодного тока проходит преимущественно через конденсатор C, который оказывает этой составляющей сопротивление во много раз меньшее, чем $r_{см}$.

Величина сеточного смещения определяет режим работы электронной лампы и форму кривой анодного тока. Различают несколько классов усиления, соответствующие различным режимам работы усилительных ламп.

На рис. 13-44 напряжение смещения выбрано с таким расчетом, что при всех значениях сеточного напряжения анодный ток определяется по прямолинейной части динами-

ческой характеристики. В этом случае входное напряжение в точности воспроизводится переменной составляющей анодного тока и усиление происходит без искажения — оно относится к классу A. Ток покоя I_{a0} очень велик, схема имеет низкий (меньше 50%) к. п. д.

На рис. 13-48 напряжение смещения увеличено — класс усиления AB. Переменная составляющая анодного тока

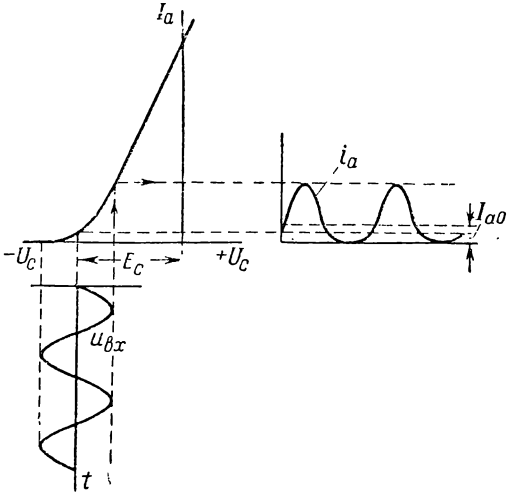


Рис. 13-48. График анодного тока при большом сеточном смещении.

искажается, так как лампа работает на непрямолинейном участке динамической характеристики. Постоянная составляющая тока уменьшилась, а к. п. д. увеличился по сравнению с предыдущим случаем.

Увеличив еще напряжение смещения, получим классы усиления B и C, при которых переменная составляющая анодного тока будет представлять собой срезанные полуволны тока с еще большим искажением.

13-12. ТРАНЗИСТОРЫ — ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ УСИЛИТЕЛИ

В последнее время широкое применение в качестве усилителей получили полупроводниковые триоды или транзисторы. Применяются сплавные и плоскостные триоды.

Полупроводниковый сплавной триод состоит из тонкой пластинки германия (рис. 13-49, *а*) с электронной (*n*) проводимостью, с двух противоположных сторон которой вплавлены кусочки индия. Индий, диффундируя в германий, образует области (*1* и *3*) с дырочной (*p*) проводимостью. Толщина области с *n* проводимостью составляет несколько микрон или несколько десятков микрон. Смежные области, отделенные друг от друга *p-n* переходами, называются эмиттер (*э*), основание или база (*б*) и коллектор (*к*) (рис. 13-49, *б*).

Между эмиттером и базой (рис. 13-49, *б*) в прямом направлении включается источник постоянного напряжения

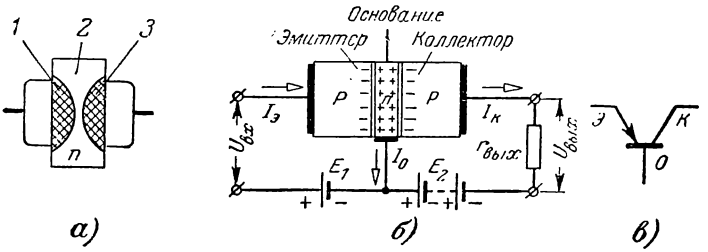


Рис. 13-49. Полупроводниковый триод.

а — схема устройства; *б* — схема включения; *в* — условное обозначение.

E_1 порядка 1 *в* и входное переменное напряжение $u_{вх}$ — сигнал, подлежащий усилению. Между коллектором и базой включается в обратном направлении источник постоянного напряжения E_2 порядка нескольких десятков вольт и нагрузочное сопротивление, напряжение на котором представляет собой усиленный сигнал.

В область эмиттера вводят значительно больше атомов примеси, чем в область основания. Вследствие этого концентрация дырок в эмиттере во много раз больше концентрации электронов в основании. Напряжение E_1 в цепи эмиттер—основание действует в прямом направлении, а так как прямая проводимость перехода *p-n* велика, то даже при малом напряжении E_1 (порядка 1 *в*) ток $I_э$ эмиттер—основание, обусловленный движением преимущественно основных носителей — дырок, сравнительно велик. В основании незначительная часть дырок рекомбинирует со свободными электронами, а основная часть дырок под действием электрического поля источника E_2 проходит через *p-n* переход в кол-

лектор. Таким образом, в цепи: основание—коллектор—нагрузка возникает ток $I_к = I_э - I_б$ того же порядка, что и на участке эмиттер—основание. При этом незначительное изменение входного сигнала вызывает значительное увеличение не только токов $I_э$ и $I_к$, но и выходного напряжения $U_{вых}$ вследствие значительной величины сопротивления нагрузки $r_{вых}$.

Действие транзистора аналогично действию электронного усилителя.

Приращение сеточного напряжения в электронной лампе вызывает изменение электронного потока, усиление анодного тока и увеличение напряжения на нагрузке. В транзисторе приращение напряжения между эмиттером и основанием вызывает изменение количества эмиттированных дырок, усиление тока в цепи коллектора и увеличение напряжения на нагрузке.

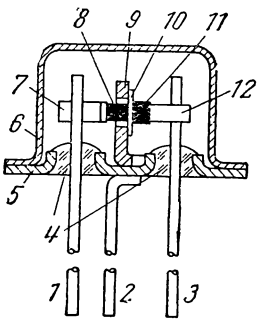


Рис. 13-50. Устройство плоскостного германиевого транзистора типа П-13.

Кроме рассмотренной схемы (рис. 13-49, *б*) включения транзисторов, применяются и другие схемы их включения.

Наряду с рассмотренными транзисторами типа *p-n-p* применяются транзисторы типа *n-p-n*. В последнем под действием увеличенного напряжения между эмиттером и базой эмиттируются электроны из области *n* в область *p*. В схемах с транзисторами типа *n-p-n* полярность источников E_1 и E_2 должна быть обратной по сравнению с полярностью тех же э. д. с. в схемах с триодами типа *p-n-p*.

Устройство плоскостного германиевого транзистора типа П-13 дано на рис. 13-50.

Основанием триода является пластина *10* кристаллического германия с электронной проводимостью. Она укреплена на стойке *9*, соединенной с выводом *2*. С двух сторон в пластину вплавлены индиевые электроды *8* и *11*. При изготовлении атомы индия диффундируют в германий, образуя одну область с дырочной проводимостью — эмиттер *8* и другую также с дырочной проводимостью — коллектор *11*. Этот триод типа *p-n-p* заключен в металлический корпус *5*, *6*. Выводы от эмиттера *7*, *1* и коллектора *3*,

12 изолированы от корпуса стеклянными проходными изоляторами *4*.

Транзисторы обладают прочностью, стабильностью, малыми габаритами и весом, значительно бо́льшим сроком службы по сравнению с электронными триодами.

13-13. ГЕНЕРАТОРЫ

а) Ламповый генератор синусоидальных колебаний

Переменные токи высокой частоты получают от ламповых генераторов. Главными элементами генератора являются электронная лампа и колебательный контур.

При напряжении $U_{C\text{м}}$ на зажимах конденсатора в его электрическом поле сосредоточена энергия $W_{C\text{м}} = \frac{CU_{C\text{м}}^2}{2}$. При замыкании такого конденсатора (рис. 13-51) на индуктивную катушку, активным сопротивлением которой можно пренебречь, начнется разряд конденсатора и в цепи возникнет ток. При этом напряжение на конденсаторе уменьшается и энергия электрического поля переходит в энергию магнитного поля катушки, а ток в цепи увеличивается. В момент окончания разряда конденсатора, когда напряжение на нем уменьшится до нуля ($U_C = 0$), энергия электрического поля полностью перейдет в энергию магнитного поля, которая достигнет своего максимума

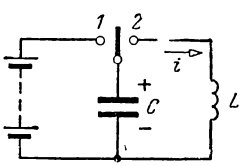


Рис. 13-51. Колебательный контур.

$$W_{L\text{м}} = \frac{LI_{\text{м}}^2}{2} = W_{C\text{м}},$$

в соответствии с максимумом тока в цепи.

Достигнув максимума, ток будет уменьшаться, проходя в том же направлении, так как э. д. с. самоиндукции имеет положительное значение $\left(e_L = -L\frac{di}{dt}\right)$. Ток того же направления (указан стрелкой, рис. 13-51) вызывает накопление положительных зарядов на пластине, бывшей ранее отрицательной, и отрицательных зарядов на пластине, бывшей ранее положительной (верхней).

Этот процесс перезарядки конденсатора продолжится до тех пор, пока вся энергия контура не сосредоточится в

электрическом поле, а напряжение на конденсаторе не достигнет прежнего максимума, но с обратным знаком. Зарядившись, конденсатор начнет разряжаться, но только в обратном направлении, затем снова заряжаться и т. д.

Таким образом, в контуре LC энергия электрического поля переходит в энергию магнитного поля и наоборот, т. е. в цепи происходят незатухающие колебания энергии, отсюда и название ее *колебательный контур*. Ток и напряжение в рассматриваемой цепи изменяются синусоидально. Напряжение на конденсаторе в произвольный момент времени равно э. д. с. самоиндукции и сдвинуто по фазе относительно тока на четверть периода.

Подставив выражение амплитуды тока $I_м = U_{C\,м}\omega C$ (§ 5-12) в уравнение энергии $W_{L\,м} = \frac{LI_м^2}{2}$, получим:

$$W_{L\,м} = \frac{LU_{C\,м}^2\omega_0^2C^2}{2} = \frac{CU_{C\,м}^2}{2} = W_{C\,м},$$

откуда найдем угловую частоту собственных колебаний контура

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Амплитуда тока

$$I_м = U_{C\,м}\omega_0 C = U_{C\,м}\frac{1}{\sqrt{LC}}C = \frac{U_{C\,м}}{\sqrt{L/C}}.$$

Величину $\sqrt{L/C}$ принято называть *волновым сопротивлением контура*.

Если цепь LC имеет активное сопротивление r, не превышающее удвоенного волнового сопротивления, то в контуре также возникает колебательный процесс, но в этом случае при каждом колебании часть электрической энергии превращается в тепло и поэтому амплитуды тока и напряжения с каждым полупериодом уменьшаются и колебательный процесс затухает.

При необходимости получить незатухающие колебания в контуре LC с активным сопротивлением необходимо сообщать контуру энергию, равную тепловым потерям в активном сопротивлении. Если, кроме того, часть энергии отдается контуром в цепь нагрузки, то такое же количество энергии необходимо доставить контуру.

В ламповом генераторе энергия источника постоянного тока преобразуется в энергию переменного тока высокой

частоты, которая определяется параметрами контура (L, C). Электронная лампа в этом процессе преобразования энергии является регулятором, при посредстве которого энергия периодически вводится в колебательный контур, откуда она передается в нагрузочную цепь.

Одна из схем лампового генератора дана на рис. 13-52.

При включении на зажимы «+» и «—» лампового генератора источника постоянного тока конденсатор C колебательного контура зарядится до напряжения $U_{C\,м}$. После этого конденсатор начнет разряжаться на катушку L коле-

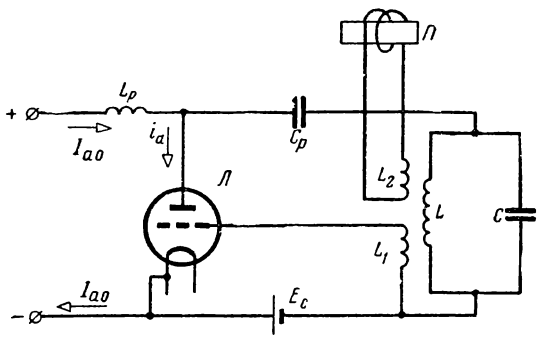


Рис. 13-52. Схема лампового генератора.

бательного контура и в контуре возникнут колебания с собственной частотой $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Катушка обратной связи L_1 соединена с сеткой лампы, поэтому напряжение на сетке будет определяться индуктированной в катушке L_1 э. д. с., имеющей частоту ω_0. Таким образом, в анодной цепи лампы возникнет пульсирующий ток i_a (рис. 13-44), характер которого зависит от напряжения смещения E_c. Постоянная слагающая этого тока I_{a0} не может пройти в колебательный контур, так как этому мешает разделительный конденсатор $C_р$, и она проходит через источник питания и разделительную катушку $L_р$. Переменная слагающая анодного тока $I_{a.\,м} \sin \omega_0 t$ при высокой частоте не может пройти в источник питания из-за большого реактивного сопротивления разделительной катушки $\omega_0 L_р$, и она проходит через колебательный контур. Так как она совпадает по фазе с напряжением колебательного контура, то она обеспечивает периодическую передачу энергии этому контуру.

Цепь нагрузки состоит из потребителя $П$ (рис. 13-52) и катушки L_2, индуктивно связанной с катушкой L колебательного контура. Таким образом, энергия из колебательного контура к потребителю передается через посредство магнитного потока, пронизывающего катушки L_2 и L.

б) Генераторы с кривой пилообразного напряжения

В некоторых устройствах, например в электронных осциллографах, необходимо иметь напряжение, кривая которого имеет пилообразную форму (рис. 13-53).

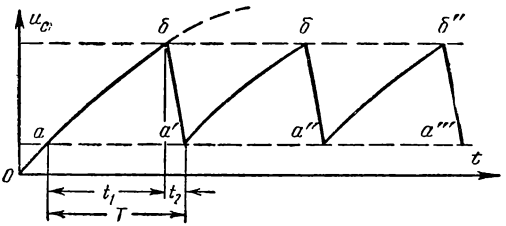


Рис. 13-53. Кривая пилообразного напряжения.

Кривая должна иметь нарастающую часть возможно близкой к прямой линии, возможно большую крутизну спадающей части и возможность широкого регулирования длительности периода зуба или соответственно частоты пилообразного напряжения.

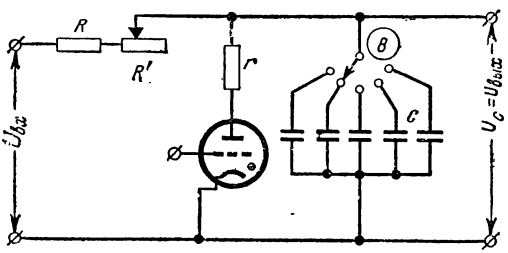


Рис. 13-54. Схема генератора пилообразного напряжения.

Одна из возможных схем генератора с пилообразным напряжением дана на рис. 13-54.

После включения постоянного напряжения на входные зажимы генератора конденсатор C будет заряжаться через

сопротивления R и R'. При этом напряжение на зажимах конденсатора и на цепи лампы увеличивается по кривой *Оаб* до величины зажигания тиратрона (точка *б* кривой рис. 13-53). С этого момента конденсатор быстро разряжается через тиратрон, так как при зажигании тиратрона его сопротивление уменьшается до незначительной величины и сопротивление цепи тиратрона становится во много раз меньше сопротивлений R и R'. Разряд конденсатора и уменьшение напряжения на его зажимах происходят очень быстро и продолжаются до тех пор, пока тиратрон не погаснет (точка *а'* кривой рис. 13-53). После этого конденсатор снова начнет заряжаться, а напряжение на его зажимах увеличиваться (кривая *а'б'*) и т. д.

Из изложенного следует, что напряжение $U_{вых}$ на выходных зажимах генератора будет изменяться пилообразно (кривая *а*, *б*, *а'*, *б'*, *а''*, *б''* и т. д.).

Изменяя потенциал сетки тиратрона, можно регулировать напряжение зажигания тиратрона, а следовательно, и величину пилообразного напряжения. Частоту пилообразного напряжения регулируют изменением сопротивления R' и изменением емкости конденсатора C.

Так как процесс ионизации и деионизации в тиратроне требует некоторого времени, то генераторы на тиратронах применяются для получения пилообразного напряжения частотой не выше 50 *кгц*. Для получения напряжения более высокой частоты применяют генераторы на электронных лампах.

в) Мультивибраторы

За последнее время расширяется применение импульсной техники и различных импульсных генераторов. Мультивибратор это электронный генератор импульсов напряжения прямоугольной формы.

На рис. 13-55 дана одна из схем мультивибратора.

В симметричном мультивибраторе применяются одинаковые лампы, одинаковые сеточные сопротивления $r_1 = r_2$, одинаковые конденсаторы $C_1 = C_2$ и анодные сопротивления $r_{a1} = r_{a2}$.

В начальный момент времени t_0 (рис. 13-56) лампа $Л_2$ открыта, лампа $Л_1$ заперта, так как отрицательное сеточное напряжение U_{c1} велико. Анодное напряжение на первой лампе U_{a1} примерно равно напряжению источника питания U_a, так как падение напряжения на сопротивлении r_{a1},

вызванное зарядным током конденсатора C_1, незначительно. Конденсатор C_1 заряжается через сопротивления r_{a1} и r_2 под действием напряжения U_a источника постоянного тока.

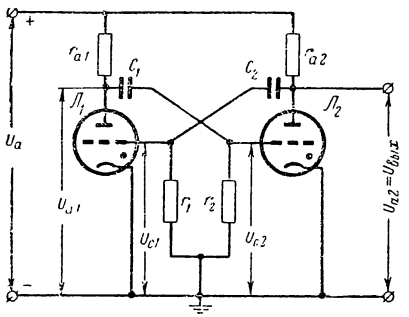


Рис. 13-55. Симметричный мультивибратор.

Ток, заряжающий конденсатор C_1, создает на сопротивлении r_2 положительное сеточное напряжение U_{c2}, при котором лампа $Л_2$ открыта. Одновременно конденсатор C_2 разряжается через лампу $Л_2$ и сопротивление r_1. Разрядный ток этого конденсатора вызывает на сопротивлении r_1 большое падение напряжения U_{c1}, запирающее лампу $Л_1$. При разряде конденсатора C_2 напряжение U_{c1} на сетке лампы $Л_1$ уменьшается и в момент времени t_1 становится таким, при котором лампа $Л_1$ отпирается, а лампа $Л_2$ запирается. При этом анодное напряжение U_{a1} быстро падает.

С момента t_1 конденсатор C_2 начнет заряжаться через сопротивления r_{a2} и r_1, зарядный ток создает положительное напряжение на сетке лампы $Л_1$, которая до момента t_2 будет открыта. В то же время конденсатор C_1 начнет разряжаться через сопротивление r_2 и открытую лампу $Л_1$, вызывая падение напряжения U_{c2}, запирающее лампу $Л_2$.

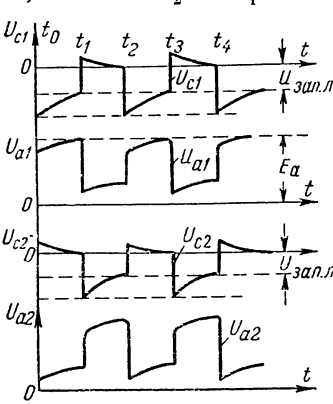


Рис. 13-56. Графики напряжений мультивибратора.

В момент t_1 анодное напряжение U_{a2} скачком возрастает до величины, близкой к напряжению источника питания U_a.

В момент t_2 напряжение U_{c2} уменьшится до величины, при которой лампа $Л_2$ откроется, а лампа $Л_1$ запрется и,

следовательно, напряжение U_{a1} скачком возрастет, а напряжение U_{a2} — упадет. После этого процесс начнет повторяться.

Периодическое отпирание и запирание ламп приводит к получению на выходе каждой лампы примерно прямоугольных импульсов напряжения.

Частоту мультивибратора можно регулировать, изменяя сопротивления r_1 и r_2 или емкости C_1 и C_2 или, наконец, величину сеточного напряжения.

13-14. СТАБИЛИЗАТОРЫ

а) Стабилизаторы тока

Для стабилизации тока, т. е. для поддержания величины тока в нагрузке неизменной, применяют б а р е т т е р ы.

Бареттер представляет собой стальную или вольфрамовую проволоку-нить, помещенную в баллон, который заполнен водородом при давлении 50÷200 *мм рт. ст.*

Условия охлаждения и нагревания нити бареттера подобраны так, что изменение напряжения на ее зажимах вызывает почти пропорциональное ему изменение сопротивления нити. Таким образом, в известных границах изменение напряжения вызывает очень незначительное изменение тока.

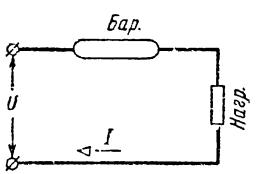


Рис. 13-57. Схема включения бареттера.

Включая бареттер последовательно с нагрузкой (рис. 13-57), получим незначительное изменение тока в цепи при значительном изменении напряжения источника питания. Если сопротивление нагрузки постоянно, то при изменении напряжения сети будет почти постоянным не только ток, но и напряжение на нагрузке.

В качестве стабилизирующего элемента можно применить двухэлектродную лампу, работающую в режиме насыщения.

б) Стабилизаторы напряжения

Для получения неизменных постоянных напряжений применяют стабилизаторы, представляющие собой приборы тлеющего разряда.

Двухэлектродный с т а б и л и т р о н имеет стеклянный баллон, в котором находится цилиндрический катод

и проволочный анод, расположенный внутри катода. Давление газа в баллоне составляет несколько десятков миллиметров ртутного столба.

Вольт-амперная характеристика стабилизатора (рис. 13-58) имеет участок *аб*, который показывает, что падение напряжения остается независимым от тока. Напряжение в пределах, соответствующих рабочему участку *аб* характеристики, называется напряжением стабилизации $U_{ст}$.

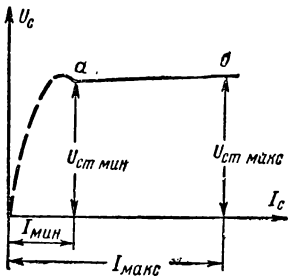


Рис. 13-58. Вольт-амперная характеристика газоразрядного стабилитрона.

Стабилитрон включается параллельно нагрузке $r_н$, напряжение на которой равно напряжению стабилизации $U_{ст}$. Последовательно с разветвленным участком включают балластное сопротивление $r_б$ (рис. 13-59). На нем будет напряжение, равное разности между входным напряжением $U_{вх}$ и стабилизированным напряжением, так как

$$U_{вх} = I_{вх} r_б + U_{ст},$$

где входной ток $I_{вх} = I_{ст} + I_н$.

Увеличение входного напряжения вызывает увеличение тока в стабилитроне, а напряжение на нем останется почти неизменным вследствие увеличения падения напряжения на балластном сопротивлении.

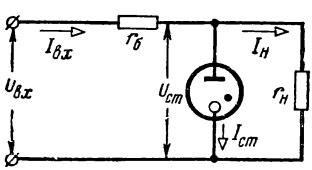


Рис. 13-59. Схема стабилизатора с газоразрядным стабилитроном.

Увеличение тока нагрузки вызовет уменьшение тока в стабилитроне, а напряжение на разветвлении останется почти неизменным. Для работы стабилизатора необходимо иметь входное напряжение бо́льшим, чем напряжение стабилизации и ток стабилитрона, лежащим в границах, определяемых рабочим участком вольт-амперной характеристикой стабилитрона.

Для получения больших стабилизированных напряжений применяется последовательное соединение стабилитронов.

Стабилитроны изготовляются на напряжения от 70 *в* и выше на токи от 5 до 40 *ма*.

Помимо рассмотренных стабилизаторов с газоразрядными стабилитронами, применяются электронные и полупроводниковые стабилизаторы.

Кремниевые стабилитроны применяются для стабилизации напряжения. Они представляют собой разновидность кремниевых диодов.

В кремниевых стабилитронах рабочим участком вольт-амперной характеристики (рис. 13-60) является та часть ее, которая соответствует обратному току, обратному напряжению и расположена примерно параллельно оси тока (на рис. 13-60 проведена сплошной линией).

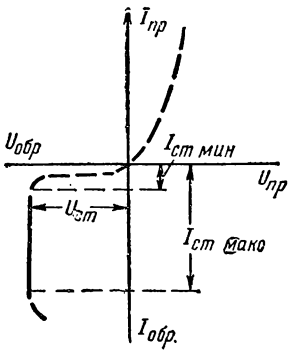


Рис. 13-60. Вольт-амперная характеристика кремниевого стабилизатора.

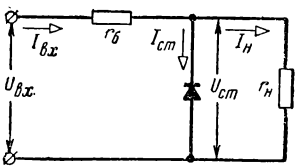


Рис. 13-61. Схема стабилизатора с кремниевым стабилитроном.

На рис. 13-61 дана схема стабилизатора напряжения с кремниевым стабилитроном, аналогичная схеме с газоразрядным стабилитроном.

Стабилитрон включается в непроводящем направлении. Нагрузка включается параллельно стабилитрону, а последовательно с разветвлением включается балластное сопротивление.

Кремниевые стабилитроны изготовляются на напряжения 7—14 *в* и токи 20—33 *ма*.

13-15. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА

Электронно-лучевая трубка нашла себе широкое применение в различных областях электротехники: радиолокация, телевидение, измерительная техника и т. д.

Стеклянный баллон трубки имеет форму колбы (рис. 13-62). Торец расширенной части колбы с внутренней стороны покрыт люминофором, образуя экран. В части трубки, про-

тивоположной экрану, расположено устройство, предназначенное для формирования электронного луча, называемое электронным прожектором, или электронной пушкой. Это устройство состоит из катода K, управляющего электрода или сетки $УЭ$ и двух анодов A_1 и A_2 цилиндрической формы. Электрическое поле между катодом и анодом сообщает электронам, покинувшим катод, необходимые скорости и придает потоку электронов форму луча, сходящегося в фокусе, расположенном на поверхности экрана. В той точке экрана, в которую попадает электронный луч, возникает свечение. Изменяя потенциал управляющего электрода, можно регулировать количество

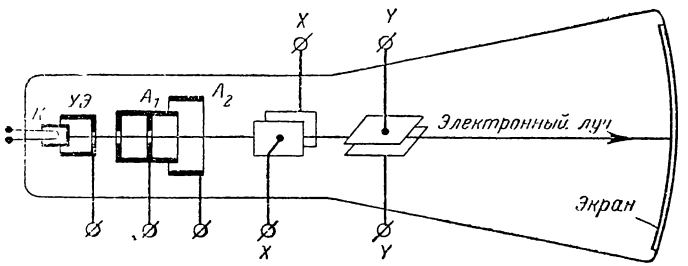


Рис. 13-62. Электронно-лучевая трубка.

электронов в луче, т. е. его интенсивность и яркость свечения экрана. Изменением потенциала одного из анодов можно выполнить более точно фокусировку электронного луча на экране с тем, чтобы получить бо́льшую резкость светящейся точки.

Электронный луч проходит между двумя парами отклоняющих пластин, к которым приложено два напряжения. Электрическое поле пластин X отклоняет электронный луч в горизонтальной плоскости, поле другой пары пластин Y отклоняет луч в вертикальной плоскости.

К пластинам X обычно подводится вспомогательное пилообразное напряжение (рис. 13-53).

С начала периода напряжение от нуля увеличивается до максимума по прямой линии, т. е. пропорционально времени, и электронный луч с постоянной скоростью перемещается по экрану слева направо; достигнув максимума, напряжение быстро (за время t_2) падает до нуля и электронный луч также быстро перемещается из крайней (правой)

точки экрана в обратном направлении, достигая исходной (левой) точки экрана к концу периода, после чего процесс повторяется снова. Вследствие многократного перемещения луча по одной и той же траектории на экране при отсутствии напряжения на пластинах Y видна светлая горизонтальная линия (рис. 13-63, *а*).

Если в какой-нибудь момент времени при перемещении луча по экрану на пластины Y будет подан импульс напряжения, то электрическое поле пластин Y вызовет пропорциональное импульсу отклонение электронного луча в вертикальном направлении. Если импульсы будут повторяться с той же частотой, как и у пилообразного напряжения, то будет повторяться в одном и том же месте экрана отклонение луча. Вследствие световой инерции экрана на нем будет видна светлая линия с зубцом (рис. 13-63, *б*), вызванным импульсом.

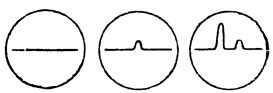


Рис. 13-63. След электронного луча на экране трубки.

Наличие двух зубцов покажет, что в течение каждого периода на пластины Y подаются два импульса.

Управлять электронным лучом можно, пользуясь электрическим или магнитным полем. В последнем случае управляющее магнитное поле создается токами, проходящими по катушкам, укрепленным вблизи трубки.

Электронно-лучевая трубка — это основная часть радиолокатора, который предназначен при помощи электромагнитных волн определять местонахождение предмета. С этой целью в предполагаемом направлении посылаются импульсы электромагнитных волн. Дойдя до предмета, волны частично отражаются. В момент посылки импульса и в момент получения отраженной волны на пластинах Y появятся импульсы напряжения, а следовательно, и зубцы на экране трубки. Расстояние между зубцами зависит от расстояния предмета до радиолокатора и может быть определено, так как скорость распространения электромагнитных волн в воздухе составляет 300 000 *км/сек*.

Электронно-лучевая трубка является также основной частью телевизора. На экране кинескопа — приемной электронно-лучевой трубки — при помощи электронного луча воспроизводится изображение.

13-16. ЭЛЕКТРОННЫЙ ОСЦИЛЛОГРАФ

Электронный осциллограф — это прибор, предназначенный для визуальных наблюдений или фотографирования кривых быстро изменяющихся электрических величин. Главной частью его служит электронно-лучевая трубка.

При наличии на отклоняющих пластинах X электронно-лучевой трубки осциллографа пилообразного напряжения электронный луч перемещается по экрану слева направо с постоянной скоростью и на экране видна горизонтальная линия (рис. 13-64).

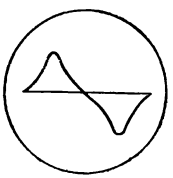


Рис. 13-64. Кривая исследуемого напряжения на экране осциллографа.

Включим на отклоняющие пластины Y измеряемое напряжение той же частоты, что и у пилообразного напряжения и совпадающее с ним по фазе. Под действием этого напряжения электронный луч в каждый момент времени отклонится в вертикальном направлении на величину, пропорциональную мгновенному значению этого напряжения. Под действием двух напряжений луч в течение каждого периода будет описывать на экране кривую измеряемого напряжения (рис. 13-64), которую можно наблюдать или сфотографировать.

Чувствительность к напряжению отклоняющих пластин обычно мала, поэтому для каждой пары пластин имеется ламповый двухкаскадный усилитель, допускающий регулировку коэффициента усиления.

Таким образом, электронный осциллограф, кроме электронно-лучевой трубки, имеет ряд устройств — узлов, смонтированных в одном кожухе. Скелетная схема, внешний вид и управление электронным осциллографом рассмотрены ниже в § 13-20.

13-17. ФОТОЭЛЕМЕНТЫ. ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЯ

В конце прошлого века А. Г. Столетов исследовал явление фотоэффекта, установил его основные закономерности и создал первый фотоэлемент.

Фотоэлементом называется прибор, предназначенный для преобразования световой энергии в электрическую.

Различают внешний и внутренний фотоэффект.

Внешний фотоэффект заключается в том, что световой поток, проникая в вещество, отдает ему свою энергию. В результате у части электронов энергия возрастает и становится достаточной для совершения работы выхода, таким образом будет иметь место выход электронов с поверхностного слоя вещества, т. е. фотоэлектронная эмиссия.

Внешний фотоэффект используется в вакуумных и газонаполненных фотоэлементах и фотоэлектронных умножителях.

Внутренний фотоэффект заключается в том, что энергия светового потока, полученная веществом, увеличивая энергию отдельных электронов, вызывает ионизацию части атомов и образование новых носителей зарядов (свободных электронов и дырок), вследствие чего возникает внутренняя э. д. с. или возрастает проводимость вещества.

Внутренний фотоэффект используется в фотоэлементах с запирающим слоем или вентильных и в фотосопротивлениях.

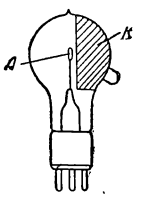


Рис. 13-65. Фотоэлемент с внешним фотоэффектом.

Вакуумный кислородно-цезиевый фотоэлемент (рис. 13-65) состоит из стеклянной колбы, в которой создан вакуум. Внутренняя поверхность ее, за исключением «окна» для прохождения света в колбу, покрывается слоем серебра (подложка), на который наносится слой окиси цезия. Слой серебра и покрывающий его полупроводниковый слой являются катодом фотоэлемента. Анодом служит металлическое кольцо, расположенное в центре колбы.

Кроме рассмотренного вакуумного фотоэлемента изготовляются еще сурьмяно-цезиевые вакуумные фотоэлементы, у которых подложка выполнена из сурьмы, на которой и наносится полупроводниковый слой.

Газонаполненные фотоэлементы изготовляются только кислородно-цезиевыми. Они отличаются от вакуумных только тем, что колба после создания в ней вакуума заполняется обычно аргоном при низком давлении.

При включении источника питания (рис. 13-66) между анодом и катодом фотоэлемента создается электрическое поле. Если через окно фотоэлемента на его катод будет падать световой поток, то эмиттированные электроны под

действием поля будут перемещаться от катода к аноду и в цепи установится фототок, который будет продолжаться в течение всего времени освещения катода.

Величина фототока зависит от светового потока, напряжения источника питания и сопротивления нагрузки.

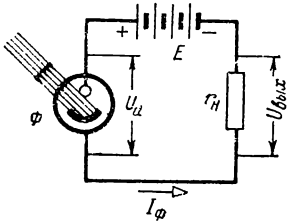


Рис. 13-66. Схема включения фотоэлемента с внешним фотоэффектом.

Вольт-амперная характеристика вакуумного фотоэлемента (рис. 13-67) показывает, что при постоянном световом потоке при увеличении напряжения фототок сначала растет, а затем остается почти неизменным.

Световая характеристика вакуумного фотоэлемента (рис. 13-68), дающая зависимость фототока от светового потока, показывает, что число эмиттированных электронов, а следовательно, и фототок пропорциональны световому потоку, падающему на катод фотоэлемента.

Отношение фототока, выраженного в микроамперах, к световому потоку, выраженному в люменах (*лм*)[1], носит название чувствительности фотоэлемента. Для вакуумных фотоэлементов она имеет значение 20 ÷ 100 *мка/лм*.

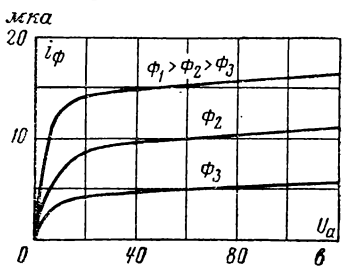


Рис. 13-67. Вольт-амперная характеристика вакуумного фотоэлемента.

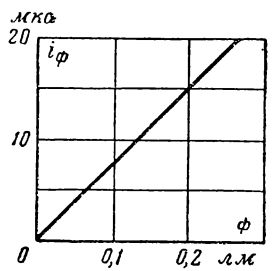


Рис. 13-68. Световая характеристика вакуумного фотоэлемента.

Газонаполненные фотоэлементы вследствие ионизации газа между электродами имеют чувствительность в 4—5 раз большую по сравнению с вакуумными фотоэлементами. Газонаполненные элементы обладают заметной инерцией.

[1] См. § 18-1.

Фотоэлектронный умножитель — это фотоэлемент с внешним фотоэффектом, фототок которого усиливается за счет вторичной электронной эмиссии.

В стеклянном баллоне (рис. 13-69), кроме катода K и анода A, расположен ряд вторичных катодов-эмиттеров K_1, K_2 и т. д., поверхность которых покрыта эмиссионным составом. Каждый следующий друг за другом катод имеет потенциал примерно на 100 *в* выше предыдущего. Каждый вторичный катод излучает больше чем число первичных электронов, его бомбардирующих. Отношение числа вторичных электронов к числу первичных называется коэффициентом вторичной эмиссии σ, имеющим

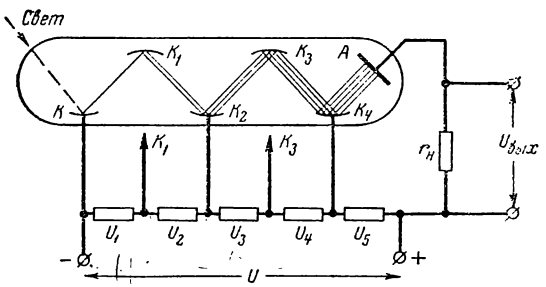


Рис. 13-69. Схема фотоэлектронного умножителя.

значение 3÷4. Таким образом, выходной ток фотоумножителя с n вторичными катодами будет σ^n.

Чувствительность фотоэлектронного умножителя достигает 1 000 *ма/лм*.

К недостаткам фотоэлектронного умножителя относятся старение — понижение чувствительности с течением времени и необходимость применять высокое напряжение.

Фотоумножитель дает возможность в ряде случаев обойтись без применения усилителей.

Работа фотоэлемента с запирающим слоем или вентильного основана на использовании запирающего слоя между полупроводниками с проводимостью p и с проводимостью n.

При освещении фотоэлемента происходит увеличение энергии отдельных электронов за счет получения ее от светового потока. Это вызывает ионизацию части атомов и образование новых носителей зарядов: электронов и дырок. Образующиеся электроны уходят в слой n, дырки — в слой p. Это приводит к избытку дырок в слое p и электронов

в слое n. Возникающая разность потенциалов (э. д. с.) между слоями p и n вызывает ток I во внешней цепи от слоя p к слою n. Величина этого тока пропорциональна количеству электронов и дырок и, следовательно, световому потоку.

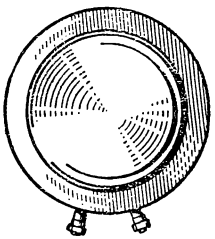


Рис. 13-70. Внешний вид фотоэлемента с запирающим слоем.

Внешний вид и схема устройства фотоэлемента с запирающим слоем показана на рис. 13-70 и 13-71.

На тонком стальном или алюминиевом диске нанесен слой полупроводника с p проводимостью, например селен, сверху накладывается тонкий полупрозрачный слой полупроводника с n проводимостью или полупрозрачный слой металла, например серебра. Поверх накладывается защитная прозрачная пленка. Запирающий слой возникает в слое полупроводника, прилегающем к полупрозрачному слою.

В качестве полупроводников применяются: селен, закись меди, сернистый таллий, сернистое серебро, кремний и др.

Кремниевый фотоэлемент состоит из пластины кремния с примесью, имеющей n проводимость. На поверхность пластины путем диффузии в вакууме вводят примесь бора, образуя область толщиной порядка 2 *мк* с p проводимостью.

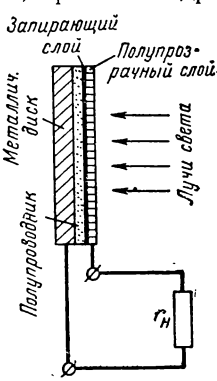


Рис. 13-71. Схема фотоэлемента с запирающим слоем.

Батареи кремниевых элементов носят название солнечных батарей и применяются для непосредственного преобразования солнечной энергии в электрическую, имея к. п. д. около 10%. Они, в частности, применяются на искусственных спутниках земли для питания радиостанции.

Фотоэлементы с запирающим слоем имеют высокую чувствительность (до 10 *ма/лм*). Преимущество их перед другими фотоэлементами заключается в том, что они не требуют источника питания.

Фотоэлементы нашли широкое применение в самых различных областях электроники, автоматики, телевидения, звуковом кино, в измерительной технике и т. д.

В качестве примера на рис. 13-72 дана схема простейшего фотореле.

Свет от лампы *1*, попадая в окно фотоэлемента *2*, вызывает фототок $I_ф$. Этот ток на сопротивлении $r_с$ создает падение напряжения $I_ф r_с$. Поэтому потенциал сетки лампы *3* ниже потенциала катода этой лампы и анодная цепь лампы заперта, тока в катушке контактора *4* нет и контакты *5* в рабочей цепи разомкнуты.

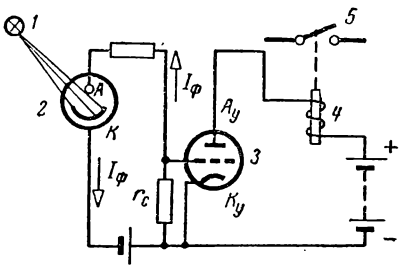


Рис. 13-72. Схема фотореле.

Появление предмета, прерывающего доступ света к фотоэлементу, вызовет исчезновение тока $I_ф$ и падение напряжения $I_ф r_с$. Лампа отпирается и анодный ток, проходя по катушке контактора, вызовет замыкание контактов в рабочей цепи.

Такое фотореле применяют для автоматического счета изделий, проходящих по конвейеру, для ограждения опасной и запретной зоны пространства и т. д.

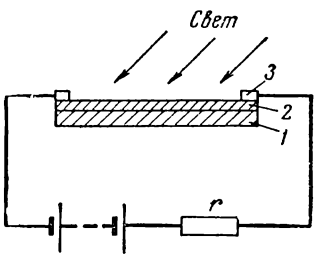


Рис. 13-73. Схема устройства и включения фотосопротивления.

Фотосопротивлением называется прибор, электрическое сопротивление которого изменяется под действием света.

Схема устройства и включения фотосопротивления показана на рис. 13-73.

На тонкую пластинку *1* из стекла, керамики или слюды наносится полупроводниковый слой *2*. Для включения в цепь на полупроводниковый слой наносятся контакты *3*. Для защиты от влаги полупроводниковый слой покрывается прозрачным лаком.

При защищенном от света фотосопротивлении через него проходит малый ток, называемый «темновым». При освещении фотосопротивления через него идет «световой» ток. Световой ток увеличивается с увеличением светового потока (освещенности).

Разность между световым и темновым током называется фототоком.

Фотосопротивления изготовляются из разных полупроводниковых материалов: сернистого свинца, сернистого висмута, сернистого кадмия и др.

Чувствительность фотосопротивления выше, чем у вакуумных фотоэлементов с внешним фотоэффектом, и достигает 100 *ма/лм*.

Фотосопротивления обладают значительной инерцией, а также нелинейной зависимостью от светового потока. Фотосопротивления широко применяются в промышленной электронике, автоматике, измерительной технике и др.

13-18. ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЯ

Термосопротивлениями или термисторами называются полупроводниковые сопротивления, обладающие резко выраженной зависимостью от температуры. Термосопротивления обладают отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, абсолютное значение которого в сотни раз больше, чем у металлов. Уменьшение сопротивления термисторов при росте температуры вызывается увеличением числа свободных носителей заряда под действием тепловой энергии.

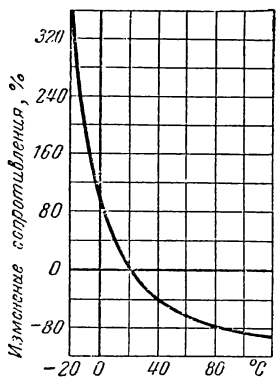


Рис. 13-74. Кривая изменения сопротивления термистора типа ММТ в зависимости от температуры.

Зависимость сопротивления от температуры для одного из типов термисторов показана на рис. 13-74.

Нагрев термосопротивлений производится передачей тепла от окружающей среды, или током, проходящим по термистору или по нагревателю.

Для устранения влияния окружающей среды термосопротивления покрываются защитной оболочкой или помещаются в стеклянные баллоны.

В зависимости от назначения термисторы имеют разную конструкцию и форму стержня, диска или шарика (рис. 13-75 и 13-76).

Устройство термосопротивления бусинкового типа показано на рис. 13-76. В стеклянном баллоне размером 3 × 8 *мм* помещен полупроводниковый шарик с сопротивлением 150 *ом*. К шарику прикреплены вольфрамовые выводы.

Эти термисторы обладают сравнительно малой тепловой инерцией и поэтому могут применяться, например, для измерения токов высокой частоты по изменению их сопротивления, обусловленного нагреванием измеряемым током.

В микротермисторах типа «игла» полупроводниковый шарик диаметром в несколько сотых долей мил-

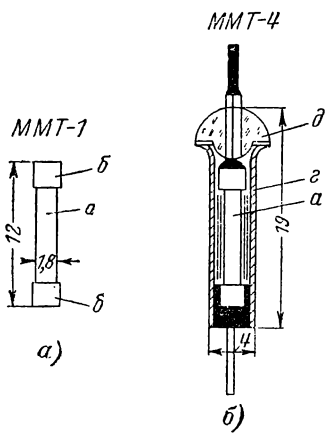


Рис. 13-75. Устройство термистора типа ММТ.

а — тело сопротивления; *б* — контактные колпачки; *г* — защитная металлическая капсула; *д* — стеклянный изолятор.

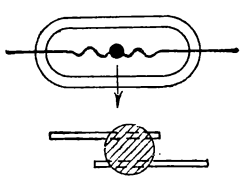


Рис. 13-76. Устройство термосопротивления бусинкового типа Т8Д.

лиметра вместе с платиновыми выводами впрессован в стекло, наружный диаметр которого равен 0,5 *мм*. Длина стеклянного корпуса 3—100 *мм*. Такой термометр дает возможность измерять температуру от —70 до + 250° С и имеет малую тепловую инерцию порядка сотых долей секунды.

Термисторы нашли себе очень широкое применение и, в частности, в автоматике, измерительной технике и др.

13-19. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с содержанием § 13-4 и 13-5.

План работы

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их основные технические данные. Для выпрямителей обязательно выяснить их номинальный ток и номинальное напряжение.

2. Собрать схему (рис. 13-77) и показать ее руководителю.

3. При различных значениях напряжения записать показания амперметра и вольтметра в табл. 13-1 и построить график прямого тока $I_{пр}$ от напряжения U, т. е. $I_{пр} = f(U)$.

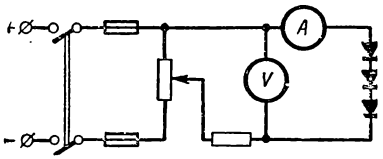


Рис. 13-77. Схема для получения графика прямого тока выпрямителя.

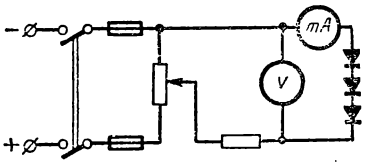


Рис. 13-78. Схема для получения графика обратного тока выпрямителя.

4. Собрать схему (рис. 13-78) и показать ее руководителю.

5. При тех же значениях напряжения, что и в п. 3, записать показания миллиамперметра и вольтметра в табл. 13-1 и построить график зависимости обратного тока $I_{обр}$ от напряжения U, т. е. $I_{обр} = f(U)$.

Таблица 13-1

№ наблюдений	U	$I_{пр}$	$I_{обр}$	$k = \frac{I_{пр}}{I_{обр}}$	Примечание
	а	*а*	*ма*	—	

Таблица 13-2

№ наблюдений	I	$I_{ср}$	$\frac{I}{I_{ср}}$	Примечание
	а	*а*	—	

6. Для каждого из полученных в пп. 3 и 5 значений напряжения U найти отношение прямого тока к обратному, т. е. определить

коэффициент выпрямления $k = \frac{I_{пр}}{I_{обр}}$. Построить график зависимости коэффициента выпрямления от напряжения, т. е. $k = f(U)$.

7. Собрать схему (рис. 13-79) и показать ее руководителю.

8. При различных значениях сопротивления (нагрузки), при замкнутом однополюсном рубильнике записать в табл. 13-2 показания

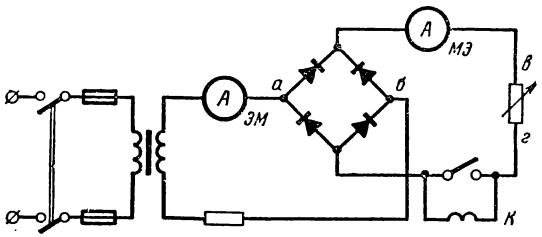


Рис. 13-79. Схема к лабораторной работе 13-19.

амперметров, измеряющих действующее значение переменного тока I и среднее значение выпрямленного тока $I_{ср}$.

Для каждого из записанных значений определить отношение $\frac{I}{I_{ср}}$.

9. Подключить к зажимам *аб* (рис. 13-79) электронный осциллограф и зарисовать кривую подведенного к выпрямителю переменного напряжения.

Подключить к зажимам *вг* (рис. 13-79) электронный осциллограф и зарисовать кривую выпрямленного напряжения на приемнике энергии при замкнутом и разомкнутом однополюсном рубильнике.

13-20. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. ЭЛЕКТРОННЫЙ ОСЦИЛЛОГРАФ

Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с содержанием § 13-13, 13-15 и 13-16.

На рис. 13-80 дана скелетная схема осциллографа типа ЭО-7, а на рис. 13-81 — его внешний вид. На передней стенке осциллографа, кроме экрана, укреплена панель управления.

Осциллограф питается от сети переменного тока с напряжением 127 или 220 *в* и подключается к сети при помощи соединительного шнура.

На панели расположены ручки управления.

Ручкой выключателя *1* (рис. 13-80 и 13-81) производится включение осциллографа в сеть переменного тока; при этом загорается сигнальная лампа *Л*.

Ручка «*Яркость*» *2* связана с движком реостата r_1 (рис. 13-80); при ее повороте изменяется потенциал управляющего электрода и изменяется количество электронов в луче, т. е. изменяется яркость пятна на экране осциллографа.

Ручка «*Фокус*» *3* связана с движком реостата r_2, при ее повороте изменяются потенциал первого анода A_1 и фокусное расстояние.

Ручка «*ось Y*» *4* и ручка «ось *X*» *5* (рис. 13-81) связаны с движками делителей напряжения, при помощи которых изменяются потенциалы

отклоняющих пластин, и, следовательно, электронный луч изменяет свое положение на экране, смещаясь соответственно по оси *Y* или по оси *X*.

Ручка «*Ослабление*» *6а* связана с переключателем делителя напряжения, подводимого к усилителю *У*. При положении ручки 1 : 1 на входные зажимы может быть подано переменное напряжение с действующим значением не более 2,5 *в*; при положении ручки 1 : 10 напряжение на входных зажимах может быть не более 25 *в* и при положении ручки 1 : 100 соответственно 250 *в*.

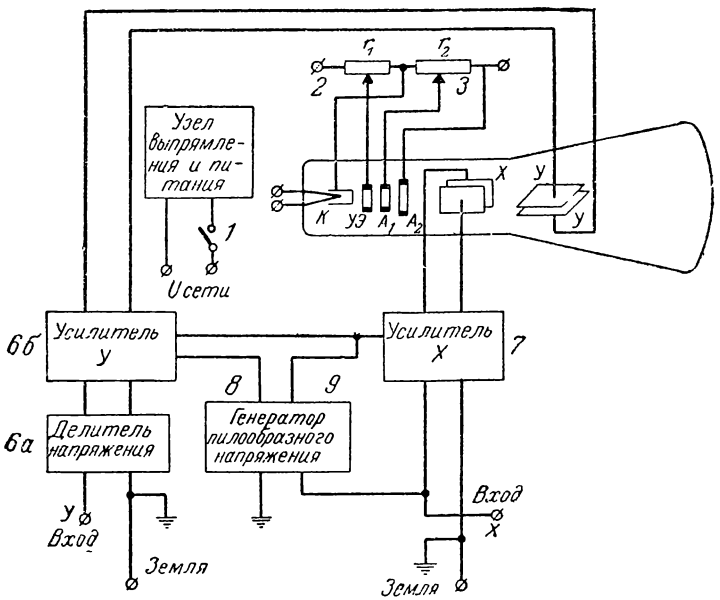


Рис. 13-80. Скелетная схема электронного осциллографа ЭО-7.

Ручка «*Усиление*» *6б* связана с движком, изменяющим напряжение, подаваемое на сетку электронной лампы усилителя *Y*, выходные зажимы которого соединены с отклоняющими пластинами *Y* электронно-лучевой трубки.

Таким образом, с помощью ручек *6а* и *6б* можно в широких пределах изменять отношение между исследуемым напряжением, подведенным к зажимам «*Вход — Земля*», расположенным на левой стороне панели, и напряжением на отклоняющих пластинах *Y*.

Ручка «*Усиление*» *7* (горизонтальное усиление) связана с движком, изменяющим напряжение, подводимое на сетку электронной лампы усилителя *X*, выходные зажимы которого соединены с отклоняющими пластинами *X* электронно-лучевой трубки. Ручкой *7* можно изменять соотношение между напряжением, подведенным к зажимам «*Вход—Земля*», расположенным на правой стороне панели, и напряжением на отклоняющих пластинах *X* (рис. 13-80).

Ручкой «*Диапазон частот*» *8* можно изменить ступенями емкость *С* генератора пилообразного напряжения (рис. 13-54), а следовательно, и частоту пилообразного напряжения.

Ручкой «*Частота плавно*» *9* можно изменить сопротивление зарядки конденсатора генератора пилообразного напряжения

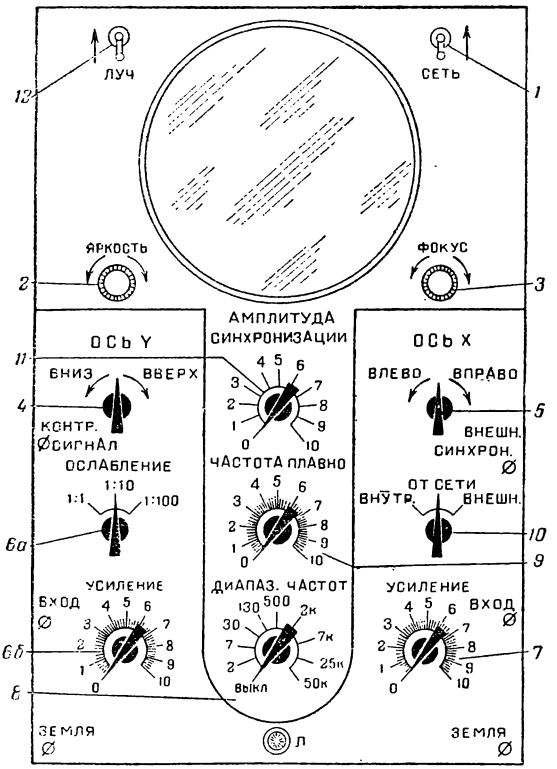


Рис. 13-81. Внешний вид электронного осциллографа ЭО-7.

(рис. 13-54) и тем самым скорость зарядки конденсатора *С*, при этом частота пилообразного напряжения изменяется плавно.

Ручка *10* может быть установлена в три положения: «*Внутренняя*», «*От сети*» и «*Внешняя*».

Для получения неподвижного изображения исследуемого напряжения на экране осциллографа необходимо, чтобы период пилообразного напряжения был в точности равен периоду исследуемого напряжения или в целое число раз больше его. Если периоды напряжения не будут удовлетворять указанному требованию, то изображение кривой на экране будет перемещаться.

Генераторы пилообразного напряжения имеют низкую устойчивость в отношении частоты. Для получения неподвижного изображения необходима синхронизация генератора пилообразного напряжения с исследуемым напряжением или с напряжением какого-либо постороннего источника напряжения, например с частотой сети, от которой питается осциллограф.

Синхронизирующее напряжение подается на сетку тиратрона генератора пилообразного напряжения через трансформатор, вызывая зажигание тиратрона с определенной частотой и тем самым выполняя синхронизацию.

Ручка управления *10* при синхронизации с исследуемым напряжением ставится в положение «*Внутренняя*»; при синхронизации с напряжением сети, питающей осциллограф, в положение «*От сети*»; при синхронизации с внешним источником, который должен быть присоединен к зажимам «*Внешняя синхронизация*», ручка *10* ставится в положение «*Внешняя*».

Ручкой «*Амплитуда синхронизации*» *11* регулируется амплитуда синхронизирующего напряжения, которое должно быть тем больше, чем больше частота генератора отличается от частоты синхронизирующего напряжения.

Ручка выключателя «*Луч*» *12* служит для выключения электронного луча. Ярко сфокусированное пятно, вызванное электронным лучом, нельзя оставлять на экране неподвижным во избежание обесцвечивания экрана.

План работы

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения работы, записать их номинальные величины, классы точности, системы, заводские номера, заводы-изготовители и другие данные.

2. Установить ручки управления: *1* — включен; *2*, *3*, *4*, *5* — средние положения; *6а* — положение 1 : 100; *6б* и *7* — нулевые положения; *8* — положение 30—130; *9* — нулевое положение; *10* — внутренняя; *11* — положение 2—3; *12* — положение «включен».

3. Собрать схему (рис. 13-82), присоединить зажимы осциллографа «*Вход*» и «*Земля*», расположенные с левой стороны панели, к точкам цепи *1—1* и показать ее руководителю.

4. Присоединить цепь питания осциллографа к сети переменного тока; поворотом ручки выключателя *1* включить его.

5. После появления на экране светлого пятна, воздействуя на ручки *2* — «*Яркость*» и *3* — «*Фокус*», получить сфокусированное яркое пятно.

6. Пользуясь ручками *4* — «*Ось Y*» и *5* — «*Ось X*», установить пятно в центре экрана.

7. Замкнуть двухполюсный рубильник (рис. 13-82).

8. Поворотом ручек *6а* и *6б* подобрать такое усиление, при котором вертикальная линия на экране, соответствующая сумме положительной и отрицательной амплитуд напряжения, была бы равна 0,25—0,40 диаметра экрана. Измерить длину этой линии AB, измерить вольтметром напряжение U и определить масштаб напряжения:

$$m_U = \frac{2\sqrt{2}\,U}{AB}.$$

Таблица 13-3

№ п/п.	Элементы цепи	U	AB	m_U	I	AO	m_I	$I_м$
		в	*мм*	*в/мм*	*а*	*мм*	*а/мм*	*а*
1	Реостат							
2	Конденсатор							
3	Катушка							
4	Трансформатор							

Измеренные и вычисленные величины записать в таблицу 13-3.

9. Воздействуя на ручку *9*, получить устойчивую неподвижную кривую исследуемого напряжения.

Зарисовать кривую напряжения.

Если получить устойчивую неподвижную кривую не удается, ручку *10* поставить в положение «*От сети*» и получить неподвижную кривую.

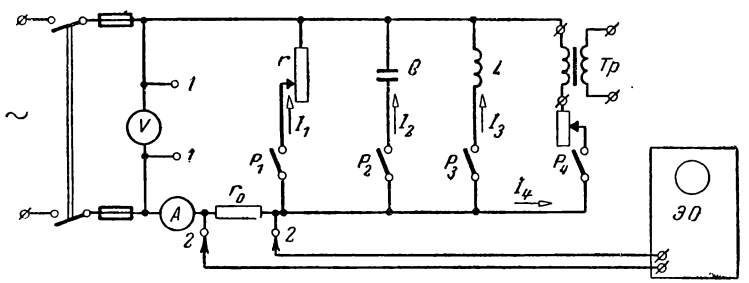


Рис. 13-82. Схема включения электронного осциллографа к работе 13-20.

10. Соединить зажимы «*Вход — Земля*» (левая сторона панели осциллографа) с зажимами сопротивления r_0 (зажимы *2—2*, рис. 13-82); при замкнутом рубильнике P_1 получить кривую напряжения на зажимах сопротивления r_0, которая в другом масштабе является кривой тока первой параллельной ветви.

Измерив амплитуду кривой тока OA и амперметром ток I_1, определим масштаб тока

$$m_I = \frac{\sqrt{2}\, I_1}{AO}.$$

Зарисовать кривую тока.

11. Замкнуть рубильник P_2 (при разомкнутых остальных однополюсных рубильниках), получить на экране кривую тока в цепи конденсатора и зарисовать ее.

Измерить действующее и амплитудное значение тока I_2.

12. Замыкая по очереди рубильники P_3 и P_4 (при разомкнутых остальных однополюсных рубильниках), получить кривые токов I_3 и I_4. Зарисовать кривые токов и измерить действующие и амплитудные значения токов.

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 13-3.

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

ЭЛЕКТРОПРИВОД И АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ

14-1. СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В большинстве случаев на предприятиях различные механизмы и станки приводятся в движение электродвигателями. В соответствии с требованиями производства электродвигатель должен быть выбран по мощности и характеристикам, защищен от вредного влияния окружающей среды и снабжен пусковой, регулировочной и защитной аппаратурой. Вся совокупность устройства для питания, управления и регулирования называется системой электропривода.

Одним из важнейших этапов в расчете электропривода является подбор двигателя соответственно требованиям производственного механизма. В первую очередь возникает вопрос о необходимой для привода мощности двигателя. Однако мощность, развиваемая данным двигателем и указанная на его щитке, не является постоянной величиной, а зависит от характера нагрузки и температуры окружающей среды. Ранее указывалось о перегрузочной способности двигателя, т. е. об отношении $M_м/M_н$. Эта величина для асинхронных двигателей общепромышленного применения 1,8—2,5, для крановых асинхронных двигателей 2,3—3,3, для синхронных двигателей 1,8—2,5. Перегрузочная способность есть величина, указывающая на физический предел мощности, которую машина способна развить кратковременно. Во избежание остановки двигателя тормозной момент производственного механизма не должен превысить величину $M_м$. Двигатели постоянного тока не имеют физического предела мощности (см. § 8-17 и 8-18), однако и для них ухудшение коммутации и возможность возникновения кругового огня по коллектору ставят предел кратковременно развиваемого максимального момента. Перегрузочная способность двигателей постоянного тока равна приближенно 2,5, а крановых двигателей постоянного тока 3,0—4,0 при номинальной скорости вращения.

14-2. НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Номинальный момент, а значит, и номинальная мощность, развиваемая двигателем в длительном режиме, определяется нагревом двигателя, который ограничивается, главным образом, классом нагревостойкости изоляции, применяемой для обмоток. В табл. 14-1 приведены значения предельной температуры для материалов, применяемых в электромашиностроении.

Таблица 14-1

Классы электроизоляционных материалов

Класс нагревостойкости	Предельно допустимая температура, °С	Характеристика материала
У	90	Непропитанные хлопчатобумажные ткани, пряжа, бумага и волокнистые материалы из целлюлозы и шелка
А	105	Те же материалы, но пропитанные
Е	120	Некоторые синтетические органические пленки
В	130	Материалы из слюды, асбеста и стекловолокна, содержащие органические связующие вещества
F	155	Те же материалы в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами
Н	180	Те же материалы, но в сочетании с кремний-органическими связующими и пропитывающими веществами
С	Более 180	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц, асбест, применяемые без связующих составов или с неорганическими связующими составами

Стальные сердечники и другие части, соприкасающиеся с обмотками, при изоляции обмоток класса А и класса В не должны иметь соответственно температуру выше 65 и 85°. Контактные кольца при тех же классах изоляции обмоток должны иметь температуру не выше 70 и 90°, а коллекторы 65 и 85°. Температура подшипников скольжения не должна превышать 80°, а подшипников качения 95°.

Предельно допустимые температуры указаны для частей машины при температуре охлаждающей среды +35°. Если изоляция работающей машины имеет температуру, бóль-

шую указанной в табл. 14-1, то срок службы изоляции сильно сокращается. Пониженная температура удлиняет срок службы машины, но машина при этом плохо используется и не экономична.

На рис. 14-1 показана кривая нагревания машины при работе, т. е. $\vartheta = f(t)$, где ϑ — температура машины, а t — время работы. В момент включения машины ($t = 0$) температура всех ее частей равна температуре окружающей среды ϑ_0. В первое время работы перепад температуры от машины к окружающей среде мал, а значит, и излучение во внешнюю среду мало и все тепло, почти целиком, идет на повышение температуры машины. Кривая быстро идет вверх. Чем больше нагревается машина, тем большая часть тепла излучается во внешнюю среду и рост температуры машины замедляется. Через некоторое время приток тепла становится равным отдаче его в окружающее пространство и повышение температуры машины прекращается. При установившейся температуре $\vartheta_{уст}$ и неизменной нагрузке машина может работать неопределенно длительное время. Такой режим называется продолжительным режимом.

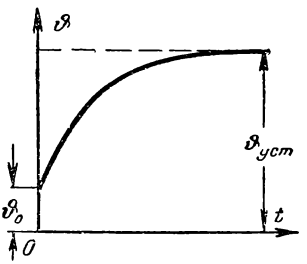


Рис. 14-1. Кривая нагревания машины при работе.

Машины, у которых не предусмотрено специальных мер для охлаждения, называются мацинами с естественной вентиляцией. Такой способ отвода тепла неинтенсивен и применяется только при очень малой мощности (десятки ватт).

Обычно же на валу ротора помещают вентилятор, который высасывает из машины нагретый воздух. Это машины с самовентиляцией. В машинах с независимой вентиляцией охлаждающий воздух подается в машину от постороннего вентилятора. Этот способ применяется только для машин большой мощности.

14-3. ВЫБОР МОЩНОСТИ ПРИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Если нагрузка двигателя постоянна (рис. 14-2), то мощность двигателя можно определить по формулам, приводимым в справочниках для различных механизмов. Напри-

мер, мощность двигателя, приводящего во вращение вентилятор:

$$P = \frac{Q_{сек} H}{102 \eta_в \eta_п} \ (квт),$$

где $Q_{сек}$ — производительность вентилятора, $м^3/сек$;
H — полный напор, *мм вод. ст.*;
$\eta_в$ — к. п. д. вентилятора (0,3—0,7);
$\eta_п$ — к. п. д. передачи от вентилятора к двигателю.

Если двигатель работает с переменной нагрузкой, то для определения его мощности надо иметь график нагрузки

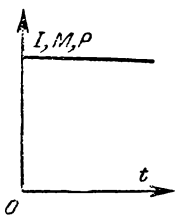


Рис. 14-2. Диаграмма неизменной нагрузки двигателя.

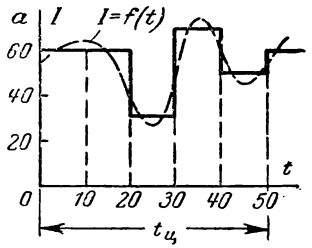


Рис. 14-3. Диаграмма для выбора мощности двигателя при продолжительном режиме.

$I = f(t)$ подобный представленному пунктиром на рис. 14-3. Этот график заменяют ступенчатой кривой тока и при построении полагают, что за время t_1 двигатель берет ток I_1, за время t_2 — I_2 и т. д. Этот ступенчатый ток за время одного цикла работы $t_ц$ заменяют таким неизменным током, который за то же время производит тепловое действие, равноценное действию тока, изменяющегося ступенями. Этот ток называют эквивалентным током $I_э$. Тогда можно написать, что

$$I_э^2 r t_ц = I_э^2 r (t_1 + t_2 + \ldots + t_n) = I_1^2 r t_1 + I_2^2 r t_2 + \ldots + I_n^2 r t_n.$$

Отсюда вычисляется эквивалентный ток

$$I_э = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \ldots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}}. \qquad (14\text{-}1)$$

Эквивалентный ток должен быть равен номинальному току выбираемого двигателя или меньше его

$$I_н \geqslant I_э.$$

Пример 14-1. Выбрать номинальный ток двигателя соответственно графику рис. 14-3:

$$I_н \geqslant I_э = \sqrt{\frac{60^2 \cdot 20 + 30^2 \cdot 10 + 70^2 \cdot 10 + 50^2 \cdot 10}{20 + 10 + 10 + 10}} = 55{,}7a.$$

У двигателей постоянного тока с параллельным возбуждением и у синхронных двигателей, работающих при неизменном потоке возбуждения:

$$M = c_м \Phi I \equiv I.$$

Поэтому формулу эквивалентного тока можно заменить формулой эквивалентного вращающего момента

$$M_э = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \ldots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}} \qquad (14\text{-}2)$$

и по этому моменту выбрать двигатель.

Если нагрузка практически не влияет на скорость вращения двигателя (жесткая характеристика скорости) или график нагрузки (рис. 13-3) есть $P = f(t)$, то двигатель выбирают по эквивалентной мощности

$$P_э = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \ldots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}}. \qquad (14\text{-}3)$$

Это возможно потому, что при $\omega = \text{const}$

$$P = M\omega \equiv M.$$

14-4. ВЫБОР МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

В кратковременном режиме двигатель работает такое ограниченное время $t_к$, за которое температура его не успевает достигнуть установившегося значения. Затем двигатель отключается и успевает охладиться до температуры окружающей среды. Так работают двигатели шлюзовых устройств, разводных мостов, зажимных приспособлений металлорежущих станков.

В этом случае пользуются формулой (14-2) в соответствии с графиком нагрузки рис. 14-4, считая, что $t_1 + t_2 + \ldots + t_n = t_к$.

Затем по каталогу выбирают двигатель, предназначенный для времени работы $t_к$, номинальный момент которого равен или больше эквивалентного момента, т. е. $M_н \geqslant M_э$. Затем двигатель проверяют на мгновенную перегрузку током так, чтобы $I_м/I_э$ было допустимым для данного двигателя.

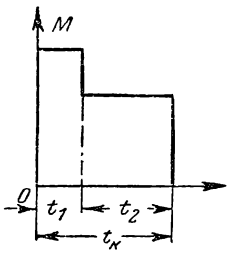


Рис. 14-4. Диаграмма работы двигателя при кратковременном режиме.

14-5. ВЫБОР МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Повторно-кратковременный режим характерен тем, что при нем периоды работы чередуются с паузами. При этом за период работы двигатель не успевает нагреться до установившегося значения температуры, а за время покоя не охлаждается до температуры окружающей среды. Диаграмма такой работы показана на рис. 14-5. В этом режиме работают двигатели кранов, лифтов, подъемников, эскаваторов и ряд двигателей прокатных цехов. Это двигатели специальной крано-металлургической серии и имеют усиленную механическую конструкцию и увеличенный пусковой момент.

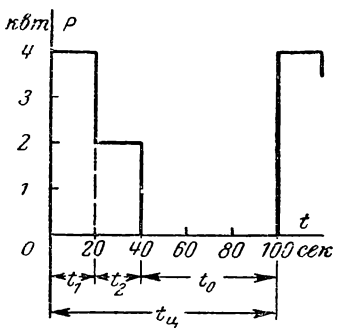


Рис. 14-5. Диаграмма работы двигателя при повторно-кратковременном режиме.

На паспорте этих двигателей указывается относительная продолжительность включения (ПВ), равная отношению суммы рабочего времени $t_1 + t_2 + \ldots + t_n$ к времени цикла $t_ц$, состоящего из суммы рабочего времени и времени паузы t_0. Таким образом,

$$ПВ = \frac{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n + t_0} 100\%. \qquad (14\text{-}4)$$

Электродвигатели строятся для стандартных $ПВ = 15$, 25, 40, 60%, причем $ПВ = 25\%$ принимается за номинальную. Чем больше ПВ, тем меньше номинальная мощность двигателя при равных габаритах.

Двигатель рассчитывается для повторно-кратковременного режима, если длительность цикла не превышает 10 *мин*.

Расчет ведется по формуле эквивалентной мощности (14-3), а затем для заданной ПВ находят номинальную мощность двигателя по каталогу крановых двигателей. В этом случае, когда найденная ПВ не соответствует ближайшей стандартной, найденную по формуле (14-3) эквивалентную мощность $P_{э1}$ пересчитывают на стандартную ПВ:

$$P_{э2} = P_{э1} \cdot \sqrt{\frac{(ПВ)_1}{(ПВ)_2}}. \qquad (14\text{-}5)$$

Пример 14-2. Выбрать номинальную мощность двигателя, работающего по графику рис. 14-5:

$$P_э = \sqrt{\frac{4^2 \cdot 20 + 2^2 \cdot 20}{20 + 20 + 60}} = 2 \text{ кВт};$$

$$ПВ = \frac{20 + 20}{20 + 20 + 60} 100\% = 40\%.$$

Для $ПВ = 40\%$ находится мощность кранового двигателя постоянного тока или асинхронного.

14-6. АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

В современном электроприводе электрические аппараты предназначены для выполнения самых различных операций с двигателями: пуск и останов двигателей, изменение скорости и направления вращения, защита от перегрузки и др. Эти действия могут выполняться обслуживающим персоналом вручную или автоматически, при соответствующей конструкции входящих в схему аппаратов.

До сих пор, еще во многих случаях, управление работой двигателей производится вручную и поэтому ниже приводится описание некоторых, часто встречающихся приборов и аппаратов ручного управления. Несомненные выгоды автоматического управления выдвинули целый ряд аппаратов, при помощи которых, без участия человека, может производиться пуск, регулирование, останов и защита электродвигателей. В большинстве случаев эти устройства увеличивают безопасность обслуживания и дают большой производственный эффект.

Р у б и л ь н и к и применяются для ручного включения электрических машин и приемников электроэнергии в цепях постоянного и переменного тока. В большинстве случаев они находят применение при напряжениях до 500 *в* и токах до 1 000 *а*.

Внешний вид рубильника показан на рис. 14-6, *а* и принятое на схемах условное изображение его — на рис. 14-6, *б*.

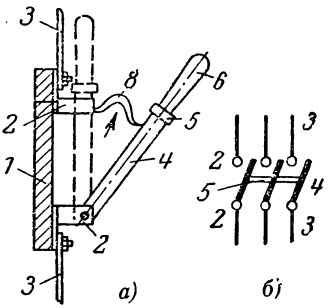


Рис. 14-6. Простой рубильник.

На изолирующей плите *1* размещены стойки *2*, которые включены в рассечку проводов *3* сети. В нижних стойках шарнирно закреплены металлические ножи *4*, соединенные вместе изолирующей траверсой *5*. К траверсе крепится ручка управления *6* для поворачивания ножей и замыкания верхних и нижних контактных стоек *2*. На рис. 14-6, *б* показано изображение трехполюсного рубильника, но рубильники могут быть одно-, двух- и многополюсными. Траверса *5* на рис. 14-6, *б* показывает, что все три ножа замыкают и размыкают линию одновременно.

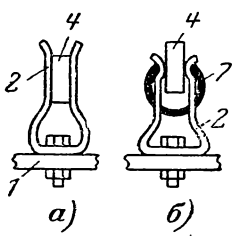


Рис. 14-7. Конструкция стоек рубильника.

Стойки *2* рубильников должны плотно сжимать ножи для обеспечения хорошего контакта. Поэтому они выполняются из упругого материала: латуни, твердотянутой меди и специальной бронзы. Показанные на рис. 14-7, *а* стойка *2* и нож *4* по замыслу должны соприкасаться друг с другом по плоскостям и обеспечивать минимальное сопротивление току, а значит, и минимальное падение напряжения в контакте. Однако отрегулировать такое состояние контакта невозможно и соприкосновение происходит по отдельным точкам поверхностей. Более удачная конструкция контакта, обеспечивающая в 2—3 раза меньшее переходное сопротивление, чем указанная выше, представлена на рис. 14-7, *б*. Здесь пружинная стойка *2* имеет на концах

полуцилиндрические поверхности и соприкасается с ножом *4* по линиям с двух сторон ножа. Для усиления давления на нож концы стойки сжимаются сильной кольцевой пружиной *7*. Этим обеспечивается достаточный нажим, а при включениях и выключениях хорошо снимается окисная пленка с ножа и стоек, чем уменьшается сопротивление контакта и нагрев стоек.

При размыкании рубильника между верхней стойкой *2* (рис. 14-6, *а*) и ножом *4* возникает электрическая дуга *8*, оплавляющая контакты и ухудшающая дальнейшую эксплуатацию рубильника. Рубильник, показанный на рис. 14-6, имеет только рабочие контакты, которые не защищены от действия электрической дуги; он применяется в цепях переменного тока с напряжением до 220 *в*. Когда размыкаемый ток меньше 70—100 *а*, то дуга гаснет от механического растяжения ее, при отходе ножа от стойки. Однако при больших токах дуга быстро движется вверх, как показано стрелкой на рис. 14-6, *а*, под влиянием электродинамических сил, действующих в контуре тока, и под влиянием тяги сильно разогретого дугой воздуха.

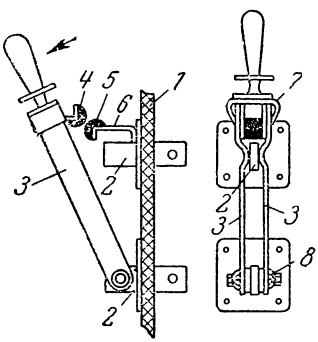


Рис. 14-8. Рубильник с дугогасящими контактами.

В установках переменного тока 380 и 500 *в* и постоянного тока 220 *в* и выше для отключения цепей под нагрузкой рубильники снабжаются дугогасительными устройствами.

На рис. 14-8 показан один полюс такого рубильника. Сквозь изолирующее основание *1* пропущены и укреплены контактные стойки *2*, которые могут замыкаться двойным ножом *3*, охватывающим стойки с двух сторон. Для получения линейного контакта на пластинах ножа отштампованы полуцилиндрические поверхности. К ножу жестко крепится угольный дугогасящий контакт *4* и такой же контакт *5* укреплен на верхней стойке *2* при помощи пружинящей полосы *6*. В положении, показанном на рис. 14-8, слева верхняя стойка *2* и нож *3*, являющиеся рабочими контактами, разомкнуты, но дугогасящие контакты еще

замкнуты. При дальнейшем движении ножа влево контакты *4* и *5* размыкаются, а возникшая между ними дуга быстро гаснет. Таким образом, возможность оплавления рабочих контактов исключена, а угольные насадки дугогасящих контактов можно сменять. Для улучшения контакта между ножом и верхней стойкой нож сжимается упругой скобкой *7*, а у нижней стойки он сжат пружинными шайбами *8*, поставленными под гайки.

Другой способ гашения дуги показан на рис. 14-9. Над неподвижным контактом *1* и подвижным *2* помещена дугогасительная решетка, состоящая из ряда металлических (стальных) пластин *3*. Отдельно такая пластина показана на рис. 14-9, *б*. Возникшая при отходе подвижного контакта *2* дуга, двигаясь вверх, загоняется между пластинами и разделяется на отдельные дуги. Для горения такой отдельной дуги требуется вполне определенное напряжение. Если разорвать дугу на такое число отдельных частей, при котором напряжение между контактами *1* и *2* меньше суммы напряжений, необходимых для горения отдельных дуг, то все они быстро гаснут. Дугогасительные контакты и решетки разных конструкций широко применяются также в автоматических выключателях всякого рода.

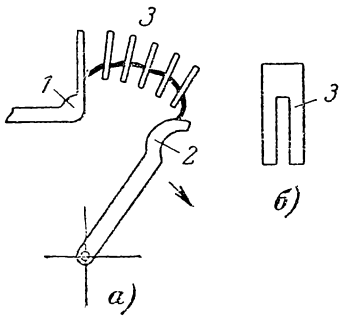


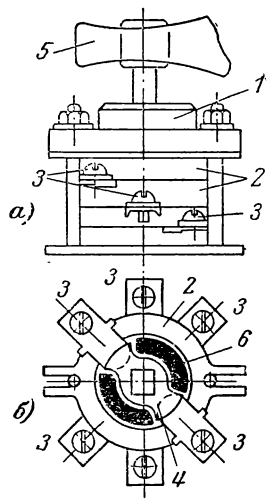
Рис. 14-9. Дугогасительная решетка.

По условиям техники безопасности при напряжениях 220, 380 и 500 *в* рубильники должны защищаться кожухами или иметь рычажный привод.

14-8. ПАКЕТНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

Пакетный выключатель — это малогабаритный отключающий аппарат, применяемый на токи от 10 до 400 *а*, предназначенный для работы в сетях с напряжением до 380 *в*. На рис. 14-10, *а* показан внешний вид пакетного выключателя, а на рис. 14-10, *б* — вид его в плане, со снятой верхней крышкой. Он состоит из неподвижных колец (шайб) *2*, выполненных из изолирующего материала,

с укрепленными на них неподвижными контактами *3*, к которым присоединяются провода сети. Подвижные контакты *4* помещены на четырехгранном валике и при повороте его ручкой *5* могут занимать два положения со сдвигом на 90°, показанные на рис. 14-10, *б* и *в*. Контакты *4* двойные и при замыкании охватывают неподвижные контакты сверху и снизу. В положении на рис. 14-10, *б* неподвижные контакты *3* замкнуты контактами *4*, а в положении на рис. 14-10, *в* — разомкнуты. Так будет во всех трех кольцах *2*, которые располо-



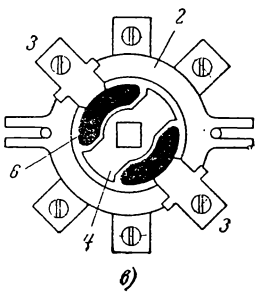


Рис. 14-10. Пакетный выключатель.

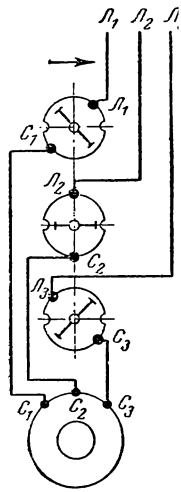


Рис. 14-11. Включение асинхронного двигателя при помощи пакетного выключателя.

жены одно над другим со сдвигом по оси, для удобства присоединения проводов.

В одной плоскости с подвижными контактами *4* расположены двойные фибровые шайбы *6*. Они поворачиваются вместе с подвижными контактами и в положении, показанном на рис. 14-10, *в*, обхватывают контакты *3* сверху и снизу. Эти шайбы служат для гашения электрической дуги. При размыкании контактов *3* и *4* возникшая дуга разлагает фибру, которая выделяет водород, углекислый газ и воду, способствующие гашению дуги. В верхней части выключателя под крышкой *1* помещается пружинный механизм, который производит быстрый поворот валика выключателя

при достаточном нажиме на ручку *5*. На рис. 14-11 показана схема включения асинхронного двигателя при помощи пакетного выключателя.

14-9. РЕОСТАТЫ ДЛЯ ПУСКА И РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Во всех схемах двигателей и генераторов были ранее показаны реостаты, которые предназначены для пуска или регулирования машины. Все реостаты собираются из стандартных элементов, представляющих собой сопротивления, закрепленные на изолирующем основании. Один элемент рамочного типа показан на рис. 14-12. На стальной пластинке *1* уложены фарфоровые полуцилиндры *2*, служащие основанием для намотки проводника с большим удельным сопротивле-

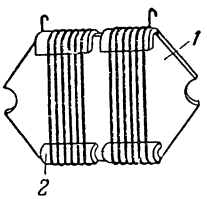


Рис. 14-12. Элемент рамочного типа для реостата.

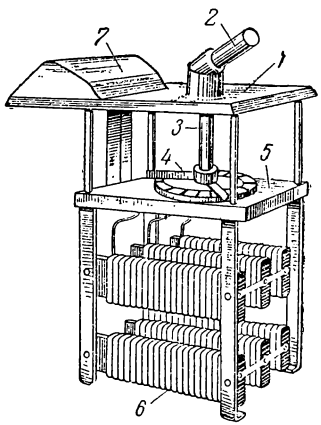


Рис. 14-13. Реостат с секциями рамочного типа.

нием. Элементы, подобные показанному, собираются в конструкцию в виде, представленном на рис. 14-13, соединяются электрически согласно системе тока и назначению и погружаются в бак с маслом для лучшего охлаждения. На верхней крышке бака *1* (рис. 14-13) помещена рукоятка *2*, при помощи которой поворачивают вал *3*, со скользящими щеточными контактами *4*. На изоляционной плите *5* закреплены неподвижные контакты, присоединяемые к секциям элементов реостата *6*. Под коробкой *7* расположены выводные зажимы реостата. На рис. 14-14 даны чугунные элементы сопротивлений, собираемые в «ящики сопротивлений».

Все сопротивления элементов должны иметь определенную, максимально допустимую температуру. Материал сопротивлений должен выдерживать длительно температуру 200—300°, при температуре окружающей среды 35°. В этом случае обеспечиваются малые габариты реостатов и стоимость. Так же как и двигатели, реостаты работают

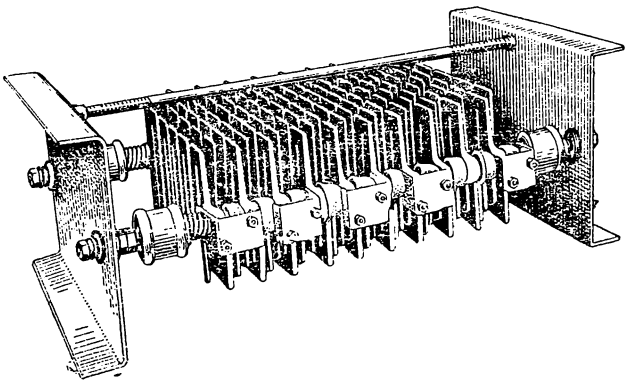


Рис. 14-14. Сопротивление из чугунных секций.

в трех режимах: длительном (цепи возбуждения, регулирование в цепи якоря или ротора, добавочные сопротивления в цепях управления), кратковременном (пусковые реостаты машин, работающих в длительном режиме) и повторно-кратковременном, для пуска двигателей этого режима. Материалом для изготовления сопротивлений служат константан, манганин, нихром, фехраль, стальная проволока и чугун.

14-10. КОНТРОЛЛЕРЫ

Для переключений в схемах соединения электродвигателей, включения и выключения добавочных сопротивлений при пуске, регулировании направления вращения применяются переключающие аппараты, называемые контроллерами. Сам контроллер содержит переключающий механизм, а сопротивления в виде наборов (ящиков) устанавливаются отдельно (рис. 14-14). Подобно тому, как рубильник может иметь несколько ножей, так и число выключателей контроллера соответствует числу мест разъ-

ема в схеме управляемой цепи. Однако в отличие от рубильника выключатели контроллера замыкают и размыкают разъемы цепи не одновременно, а в последовательности, установленной производимой операцией. Вид сверху на выключатель контроллера кулачкового типа показан на рис. 14-15, *а*.

На вертикальной раме *3* укреплен пластмассовый изолятор *2*, несущий на себе неподвижный контакт выключа-

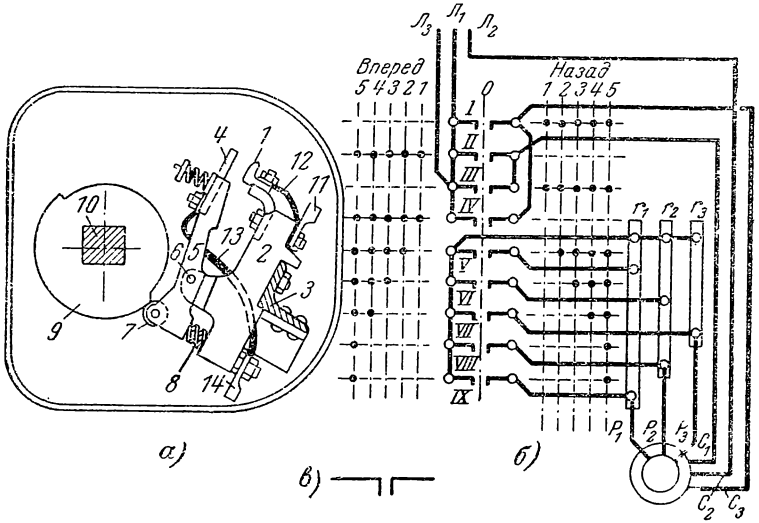


Рис. 14-15. Работа кулачкового контроллера.

теля *1*, к которому проводом *12* подводится ток от кабельного наконечника переключаемой цепи *11*. Основанием подвижного контакта *4* служит пластмассовый изолятор *5*, который может поворачиваться на оси *6*. Этот контакт присоединяется к кабельному наконечнику сети *14* проводом *13*. Пружина *8* всегда стремится прижать подвижной контакт *4* к контакту *1*. На вертикальной оси *10*, против ролика *7*, помещена кулачковая шайба *9*, при помощи которой, поворачивая ось *10*, можно замыкать и размыкать контакты *4* и *1*. Такие выключатели (кулачковые элементы) располагаются один под другим вдоль оси *10*, а число их определяется схемой включения двигателя. На схеме пуска асинхронного двигателя с кольцами (рис. 14-15, *б*) показано, что выключателей должно быть девять (*I*, *II*,

III, *IV*, *V*, *VI*, *VII*, *VIII*, *IX*), а условное обозначение их на схемах дано на рис. 14-15, *в*. На крышке контроллера, которая будет поставлена сверху, против ручки, поворачивающей ось *10*, указываются позиции *1*, *2*, *3*, *4*, *5* *вперед и назад*. Замкнутым на схеме (рис. 14-15, *б*) следует считать тот выключатель, против которого стоит точка на соответствующей позиции. В позиции *0* статор присоединен к сети зажимом C_2; в ротор включены сопротивления r_1, r_2, r_3, соединенные в звезду, и двигатель отключен. В позиции *1* вперед замыкаются выключатели *I* и *IV*, статор присоединяется к сети и двигатель начинает вращаться при полном сопротивлении в цепи ротора. При повороте ручки в позицию *2*, замыкается выключатель *V* и часть сопротивления r_1 шунтируется. При дальнейшем повороте ручки в положение позиций *3*, *4*, *5* постепенно замыкаются выключатели *VI*, *VII*, *VIII* и *IX*, чем шунтируются сопротивления во всех фазах ротора.

14-11. ПЛАВКИЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

Плавкие предохранители это устройства, защищающие установку от токов короткого замыкания. От перегрузок они защищают не надежно, так как могут выдерживать

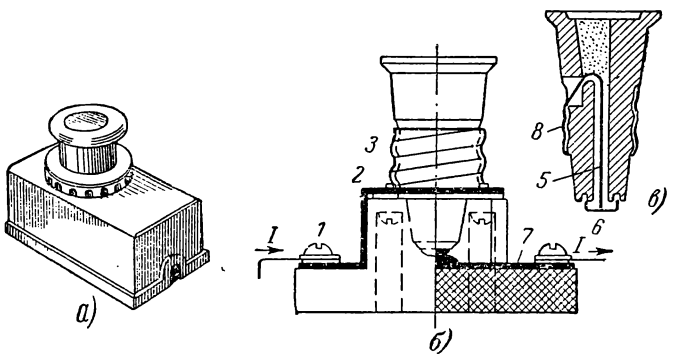


Рис. 14-16. Пробочный предохранитель.

иногда токи, превышающие номинальный в $1^1/_2$ раза, в течение часа и более. В предохранителях поставлена вставка, которая расплавляется при коротком замыкании и отключает установку. Применение самодельных вставок недопустимо.

На рис. 14-16, *а* показан внешний вид пробочного предохранителя, а на рис. 14-16, *б*, *в* — его разрез со снятой крышкой и пробка с плавкой вставкой. На фарфоровое основание пробки надета металлическая резьба *8*, которой пробка ввинчивается в резьбу патрона предохранителя *3*. Ток от зажима *1*, по металлической пластине *2*, соединенной с патроном *3*, проходит в резьбу пробки *8* и, по припаянной к ней плавкой вставке *5*, через контакт *6*, в провод зажима *7*. Пробочные предохранители применяются при напряжениях до 380 *в* и токах до 60 *а*. Смена пробок может производиться под напряжением, так как происходит без прикосновения человека к токоведущим частям.

На рис. 14-17, *а*, *б* показан предохранитель трубчатого типа ПР-2 и его разрез. Эти предохранители применяются при напряжениях до 500 *в* и номинальных токах до 1 000 *а*. На изолирующей плите *1* укреплены контактные стойки *2*, между которыми, как нож рубильника, включен предохранитель. Он состоит из фибровой трубки *3*, на концах которой навернуты латунные колпачки *4*, зажимающие ножи предохранителя *5*. К ножам болтами крепится фасонная цинковая плавкая вставка *6*, которая плавится при перегрузках в узких местах. Под влиянием электрической дуги часть фибры переходит в газ, состоящий из водорода, углекислоты и водяных паров. Внутри трубки развивается давление до 100 *ат* и дуга энергично гасится. У предохранителей на токи до 60 *а* ножей *5* нет и в стойки *2* предохранитель врубается колпачками *4*.

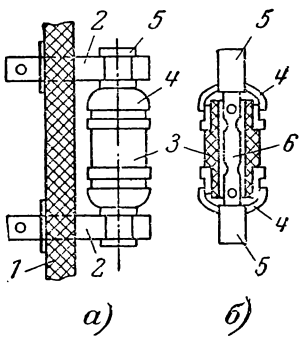


Рис. 14-17. Предохранитель трубчатого типа ПР-2.

При напряжении до 500 *в* применяются предохранители с наполнением кварцевым песком, типа ПН2, с разборными патронами на токи 100—600 *а* и НПН с неразборными патронами на токи 15 и 60 *а*. Предохранитель такого типа показан на рис. 14-18. Ножи предохранителя *3* зажимаются в контактных стойках *2*, укрепленных на изолирующей плите *1*. Ножи *3* установлены в крышках *4*, привинченных к фарфоровой трубке *5*, заполненной внутри кварцевым песком *6*. К ножам крепятся плавкие вставки *7*,

штампованные из тонких медных лент. На средней части вставок наплавлены перемычки из олова *9*. При перегрузках, когда вставка нагревается, олово начинает плавиться и постепенно растворяет медь, отчего вставка разрушается и перегорает. При коротких замыканиях вставки плавятся в узких местах между перфорациями *8*.

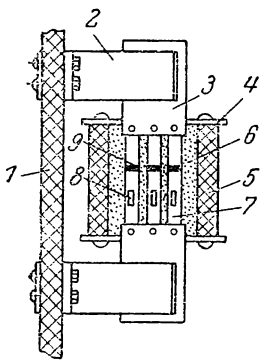


Рис. 14-18. Предохранитель типа ПН-2.

Для установок с напряжениями 1 000 *в* — 35 *кв* и на токи до 400 *а* изготовляются специальные трубчатые предохранители типа ПК с заполнением кварцевым песком. На рис. 14-19 показан такой предохранитель. Фарфоровая трубка *1*, заполненная кварцевым песком, герметически запаяна на концах колпачками *2*, которые зажимаются на изоляторах защитного устройства. Плавкие вставки *3* выполняются в виде спиралей из посеребренной медной проволоки с напаянными шариками олова *4* для облегчения расплавления спирали. Средняя спираль *5* выполняется из стальной проволоки и называется указательной. Она удерживает указательный якорек *6*, который при перегорании всех вставок выталкивается пружиной из цилиндрического углубления в нижнем колпачке *2* и указывает на перегорание вставок.

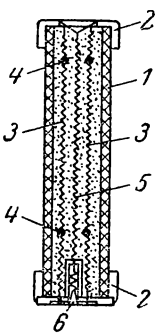


Рис. 14-19. Предохранитель типа ПК.

Плавкие вставки изготовляются из свинца, сплава свинца с оловом, цинка, алюминия, меди и серебра. Свинец и сплавы его, цинк плавятся при низких температурах (200—420°), что хорошо, но имеют малую проводимость, заставляющую делать вставки большого сечения. Вставки из меди и серебра обладают хорошей проводимостью и могут иметь малое сечение, но плавятся при температуре 1 080° и 960°. Серебряные вставки дороги и применяются только на малые токи при напряжениях более 1 000 *в*. Чаще применяют медные вставки, посеребренные для предохранения от окисления. Медные вставки могут нагреваться, не пла-

вясь до 900°, разогревая всю конструкцию предохранителя и контакты, способствуя их разрушению. Поэтому применяют металлические растворители в виде напаянных на вставку свинцовых или оловянных шариков.

14-12. ВОЗДУШНЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ (АВТОМАТЫ)

Автоматы совмещают функции рубильника и предохранителя, обеспечивая выключение при коротком замыкании и защищают сеть от перегрузок. Они применяются также для отключения цепи при исчезновении напряжения или снижении его до некоторой установленной величины. Автоматы переменного тока ставятся при напряжениях до 500 *в* включительно, а при постоянном токе — и при больших напряжениях. Автоматы применяются для сравнительно редких отключений; включение их производится вручную.

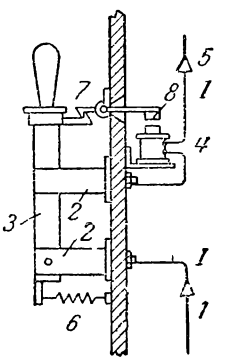


Рис. 14-20. Автоматический воздушный выключатель.

На рис. 14-20 упрощенно показан принцип работы однополюсного автомата максимального тока. Ток *I* от провода *1* проходит в нижнюю контактную стойку *2*, через нож *3*, верхнюю контактную стойку *2*, обмотку электромагнита *4* и в провод *5*. Пружина *6* стремится повернуть нож влево и разомкнуть цепь тока. Этому препятствует защелка *7* до тех пор, пока ток не достигнет величины тока срабатывания. Так называется минимальный ток, при прохождении которого по обмотке катушки *4* якорь *8* притягивается к сердечнику электромагнита. При этом токе защелка *7* расцепляется и нож *3* размыкает контактные стойки *2* под влиянием пружины *6*.

В данном случае электромагнит *4*, непосредственно действующий на защелку автомата, называется максимальным расцепителем и является простейшим электромагнитным реле максимального тока прямого действия. Время, в течение которого автомат отключает $t_{отк}$, составляет 0,05—0,025 *сек*. Если автомат предназначен для отключения при снижении напряжения, то он срабатывает при $U = 0{,}4\ U_н$.

Автомат должен выключать при коротком замыкании даже в том случае, когда ручка его удерживается рукой во включенном состоянии. Для этого механизм включения ножей имеет специальную конструкцию. Это необходимо также и для того, чтобы защитить человека от удара ручкой автомата при внезапном выключении.

Контактная система автоматов обычно состоит из рабочих и дугогасительных контактов (рис. 14-8). Последние имеют сменные угольные, латунные или металлокерамические наконечники. Для ускорения гашения электрической дуги автоматы снабжают дугогасительными решетками (рис. 14-9) с металлическими пластинами или из дугоустойчивого изоляционного материала.

14-13. КОНТАКТОРЫ

Как указывалось выше, автоматические воздушные выключатели не предназначены для частых включений и отключений. Для этой цели служат аппараты, называемые контакторами, позволяющие включать электрическую цепь до 1 500 раз в час. Они применяются в цепях постоянного и переменного тока с напряжением до 1 000 *в*. Контакторы не защищают от коротких замыканий и перегрузок и поэтому должны работать совместно с плавкими предохранителями или другими устройствами защиты. Они работают надежно при напряжениях (0,85—1,03) $U_н$ и выключают установку автоматически при снижении напряжения до (0,5—0,6) $U_н$.

На рис. 14-21 показана схема работы трехполюсного контактора переменного тока. Эти контакторы изготовляются с числом полюсов от 1 до 5, на токи 20—600 *а*. Время их срабатывания, в зависимости от величины контактора, лежит в пределах 0,05—0,1 *сек*.

На изолированной оси квадратного сечения *1*, подшипники которой для простоты не показаны, установлены подвижные рабочие контакты *2*, якорь электромагнита *3* и траверса *4*, для так называемых блок-контактов (блокировочных контактов). На изолированной плите укреплены неподвижные рабочие контакты *6*, блок-контакты *5* и ярмо *7* с обмоткой возбуждения электромагнита *8*.

В положении, представленном на рис. 14-21, рабочие контакты разомкнуты и тока в главной цепи $Л_1$, $Л_2$, $Л_3$ нет. Если в катушке *8* появится ток, то якорь *3* будет притянут

к ярму *7*, ось *1* повернется, рабочие контакты *2* и *6* и верхние блок-контакты *5* замкнутся, а нижние блок-контакты *5* разомкнутся. По этому признаку рабочие контакты и верхние блок-контакты называются замыкающими, а нижние — размыкающими. Состояние контактов на схемах всегда показывается при отсутствии тока в обмотках контакторов или реле, т. е. разомкнутое для замыкающих и замкнутое для размыкающих. Обычно для управления контакторами применяются реле (см. ниже), но в дан-

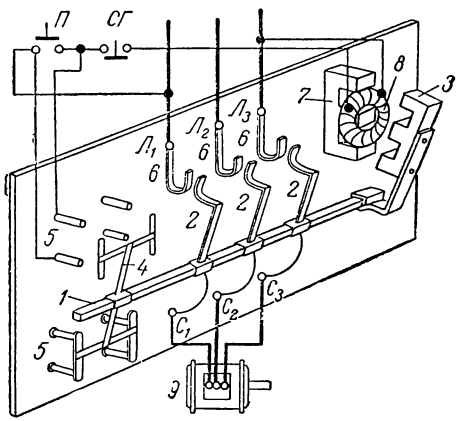


Рис. 14-21. Схема работы контактора.

ном случае показана упрощенная схема пуска и останова короткозамкнутого асинхронного двигателя *9* с кнопочным управлением.

В цепи управления показаны две кнопки, включающая *П* и отключающая *СТ*. Контакты кнопок при помощи пружин удерживаются в положениях, показанных на рис. 14-21, т. е. соответственно в разомкнутом и замкнутом. Кнопки ставятся в месте, удобном для управления, независимо от расположения контактора и двигателя.

Пуск производится следующим образом. При замыкании кнопки *П*, ток идет от провода $Л_1$, через кнопки *П* и *СТ* в обмотку электромагнита *8* и к проводу $Л_3$. Якорь притягивается и поворачивает ось *1*, при этом одновременно замыкаются рабочие контакты *2* и *6* и верхние блок-контакты *5*; последние шунтируют кнопку *П* и позволяют отпустить включающую кнопку. Для выключения двига-

теля достаточно разомкнуть цепь управления, нажав кнопку *СТ*, и контакты отпадут под влиянием собственного веса устройства.

Рабочие контакты контактора находятся в очень тяжелых условиях и для надежности действия конструируются соответственным образом. На рис. 14-22 показано примерное исполнение рабочих контактов *1* и *2*, которые делаются сменными. Крепление подвижного контакта *2* выполняется при помощи пружины *3* таким образом, что соприкосновение контактов происходит с трением и перекатыванием, бла-

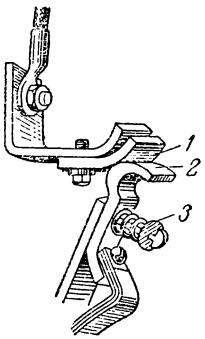


Рис. 14-22. Конструкция рабочих контактов контактора.

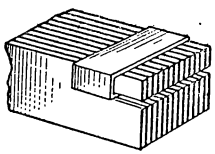


Рис. 14-23. Способ устранения вибраций якоря в контакторе.

годаря чему счищаются окислы металла, образующиеся на них. Рабочие контакты обязательно снабжаются дугогасительными решетками.

В контакторах переменного тока магнитный поток катушки возбуждения периодически переходит через нуль, что вызывает вибрации и гудение конструкции. Для устранения этого на торец сердечника катушки надевают короткозамкнутый виток, как показано на рис. 14-23. В этом витке, как во вторичной обмотке трансформатора, создается ток, сдвинутый по фазе относительно тока в катушке. Поток, созданный этим витком, замыкается через якорь и препятствует его отпаданию в моменты перехода главного потока через нуль.

14-14. РЕЛЕ

В предыдущем разделе уже говорилось, что в цепи управления контактора можно поставить реле и тогда отпадает необходимость ручного управления, а, кроме того,

появляется возможность осуществить автоматическую защиту в рабочей цепи. Реле называется такой элемент в цепи управления, который при достижении определенного значения управляемой величины (например, тока) срабатывает мгновенно (скачком). Такими аппаратами в рабочих цепях являются автоматы и контакторы, но реле ставятся главным образом в цепях управления, где токи малы, и реле могут быть выполнены во много раз более чувствительными, чем автоматы и контакторы. Характеристика, типичная для работы реле, показана на рис. 14-24.

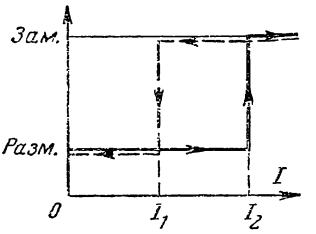


Рис. 14-24. Характеристика аппарата релейного типа.

Допустим, что момент срабатывания зависит от величины тока, проходящего через реле. До тех пор, пока ток меньше значения I_2, реле находится в одном состоянии (например, контакты его разомкнуты). При достижении током значения I_2, называемого током срабатывания, реле мгновенно переходит в другое состояние (контакты замкнуты). Это состояние сохраняется при любом токе, большем тока I_2. Если ток начинает уменьшаться, то при некотором значении I_1, называемом током отпускания, контакты скачкообразно переходят в разомкнутое состояние. Мощность, необходимая для срабатывания реле, во много раз меньше мощности цепи, которой реле управляет.

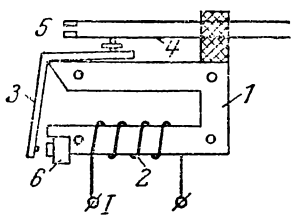


Рис. 14-25. Электромагнитное реле переменного тока.

Реле предназначаются для защиты и управления, работают на переменном токе или постоянном, срабатывают мгновенно или с выдержкой времени и называются в этом случае реле времени. По системе исполнения они делятся на электромагнитные, индукционные, электродинамические, тепловые, ионно-электронные, механические и др.

Электромагнитное реле переменного тока показано на рис. 14-25. На сердечнике *1* из листовой электротехнической стали помещена обмотка *2*, обтекаемая током управляемой цепи. В положении, показанном на

рис. 14-25, якорь *3*, удерживается силой пружины *4* и собственным весом. Когда ток *I* достигает величины I_2 (рис. 14-24), якорь притягивается к сердечнику и замыкает контакты *5* цепи управления. В замкнутом состоянии он удерживается до тех пор, пока ток *I* не уменьшится до величины I_1; якорь отпадает и контакты *5* размыкаются. На раздвоенном конце сердечника электромагнита надето кольцо *6* для устранения вибраций реле (§ 14-23).

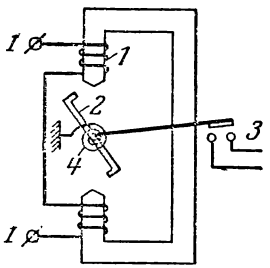


Рис. 14-26. Электромагнитное реле с поворотным якорем.

Электромагнитное реле с поворотным якорем показано на рис. 14-26. При прохождении тока срабатывания *I* по обмотке электромагнита *1* Z-образный стальной якорь *2* поворачивается и замыкает контакты *3* цепи управления. При токе отпускания якорь возвращается в исходное положение пружиной *4*. Такое реле, включаемое через трансформатор тока или напряжения, срабатывает при максимальном токе, максимальном и минимальном напряжении и др.

На рис. 14-27 дана схема теплового реле, находящего большое применение для защиты от перегрузки. Принцип его работы основан на применении двух металлических пластинок, сваренных по всей длине и имеющих разные коэффициенты линейного расширения. При нагревании такая пластинка изгибается и может механически воздействовать на устройство, замыкающее или размыкающее электрическую цепь. Ток защищаемой сети *I* проходит через нагревательный элемент *1*, нагревающий биметаллическую пластинку *2*, жестко закрепленную на одном конце. Нагреваясь, она изгибается вверх, как показано пунктиром, освобождает рычажок *3*, который, поворачиваясь под влиянием пружины *4* влево,

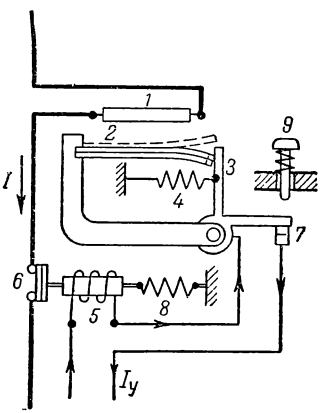
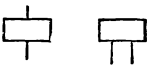
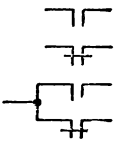
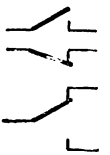
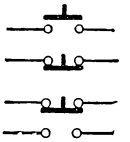
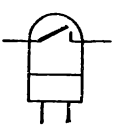
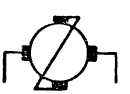


Рис. 14-27. Тепловое реле.

Таблица 14-2

Условные обозначения элементов коммутирующих устройств ГОСТ 7624-62

1	Обмотки реле, контактора и магнитного пускателя (ГОСТ 7624-62, 8.4)	
2	Контакт контактора, пускателя и блок-контакты их (ГОСТ 7624-62, 8.4) а) замыкающий б) размыкающий в) переключающий	
3	Контакт реле (ГОСТ 7624-62, 8.3) а) замыкающий б) размыкающий в) переключающий	
4	Кнопки с самовозвратом (ГОСТ 7624-2, 8.56,8.57, 8.58) а) замыкающая б) размыкающая в) размыкающая и замыкающая	
5	Реле с обозначением контактов и выводов обмотки (ГОСТ 7624-62, 8.72, 3)	
6	Нагревательный элемент теплового реле (ГОСТ 7624-62, 2.47)	
7	Электромашинный усилитель (ГОСТ 7624-62, 4.40)	

размыкает контакты цепи управления 7. Ток в обмотке электромагнита 5 исчезает и контакты 6 управляемой цепи размыкаются пружиной 8.

Для удобства изображения всех последующих схем управления электродвигателями отдельные элементы их обозначаются согласно ГОСТ 7624-62, как указано в табл. 14-2.

14-15. МАГНИТНЫЕ ПУСКАТЕЛИ

Магнитными пускателями называются устройства, служащие для пуска асинхронных короткозамкнутых двигателей, включаемых при полном напряжении сети. Они защищают двигатели при перегрузке и понижении напряжения. Для защиты от коротких замыканий

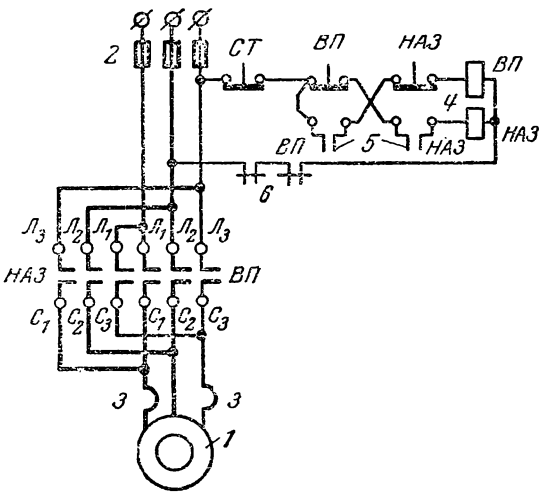


Рис. 14-28. Магнитный пускатель.

ставятся предохранители. Магнитный пускатель состоит из трехполюсного контактора, тепловых реле и блокировочных контактов, встроенных в общий ящик. Кнопки управления ставятся отдельно, обычно у производственной машины. Если требуется изменять направление вращения двигателя, то магнитный пускатель должен содержать два контактора: для хода «вперед» и «назад». Такой пускатель показан на схеме на рис. 14-28 с принятыми стандартными обозначениями его деталей.

Статор двигателя *1* присоединяется к сети через предохранители *2*, замыкающие рабочие контакты контакторов для пуска вперед (*ВП*) и назад (*НАЗ*), и нагревательные элементы *3* тепловых реле. Цепь управления состоит из кнопки «стоп» (*СТ*), кнопок для пуска вперед (*ВП*) и назад (*НАЗ*), обмоток электромагнитов контакторов *4* для пуска вперед и назад и размыкающих контактов *6* тепловых реле, показанных в замкнутом состоянии (см. рис. 14-28). Кнопки *ВП* и *НАЗ* блокируются соответственно замыкающими контактами (блок-контактами) *5* контакторов *ВП* и *НАЗ*.

Поскольку для изменения направления вращения двигателя требуется менять местами провода фаз $Л_1$ и $Л_3$, необходимо блокировкой исключать возможность одновременного включения обоих контакторов, так как это будет коротким замыканием фаз. Эта блокировка осуществляется соответствующим устройством и включением кнопок *ВП* и *НАЗ*. Обе кнопки имеют по паре контактов размыкающих (верхние) и по паре замыкающих (нижние).

Пуск «*вперед*» производится следующим образом. При нажатии кнопки *ВП* размыкаются ее верхние контакты и замыкаются нижние. Цепь для тока через обмотку электромагнита *4 НАЗ* оказывается разомкнутой. Ток идет от фазы $Л_3$ через кнопку *СТ*, замкнутые нижние контакты кнопки *ВП*, замкнутые верхние контакты кнопки *НАЗ*, обмотку электромагнита *4* контактора *ВП*, замкнутые контакты управления тепловых реле *6* к фазе $Л_2$. Рабочие контакты *ВП* и блок-контакты *5 ВП* замыкаются и кнопку *ВП* можно отпустить. Двигатель автоматически отключается при снижении напряжения, когда ток в обмотке электромагнита *ВП* уменьшается, и при перегрузках, когда тепловые реле *3* размыкают контакты управления *6*. Принудительный останов двигателя производится нажимом кнопки *СТ*. Таким же образом двигатель пускается «*назад*». Как следует из рисунка, при одновременном нажатии кнопок двигатель не включается, так как цепи управления *ВП* и *НАЗ* оказываются разомкнутыми.

14-16. МАСЛЯНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

При напряжениях выше 1 000 *в*, для включения и отключения электрических цепей под нагрузкой и при коротком замыкании выключающие устройства, кроме простоты и удобства в эксплуатации, должны быть взрыво-

и пожаробезопасными. Одним из таких устройств является масляный выключатель. На рис. 14-29 показан разрез трехфазного масляного выключателя с большим объемом масла. В нем размыкание рабочих контактов происходит в масле, которое надежно изолирует токоведущие части друг от друга и от корпуса выключателя. Кроме того, масло обладает свойством быстро гасить электрическую дугу, возникающую при размыкании контактов, в тот момент, когда переменный ток переходит через нуль.

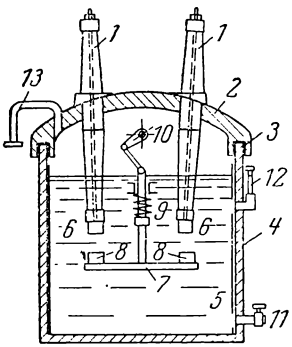


Рис. 14-29. Масляный выключатель.

Ток подводится к проводникам проходных изоляторов *1*, укрепленных на чугунной крышке *2* масляного выключателя. Крышка при помощи уплотнений *3* закрывает стальной бак *4*, наполненный маслом *5*, и крепится к нему болтами. Внутренняя поверхность бака изолируется фанерой или электрокартоном. При напряжении меньшем 10 *кв* все три фазы помещаются в один бак и тогда контакты фаз, расположенных рядом, разделяются изолирующими перегородками. Все это обеспечивает от перекрытия электрической дугой контактов рядом лежащих фаз и от замыкания на корпус бака. В нижней части изоляторов крепятся неподвижные контакты *6*, а против них, на токоведущей траверсе *7*, подвижные контакты *8*, которые во включенном состоянии замыкают контакты *6*, как ножи рубильника. Траверса пружиной *9* отжимается вниз (выключено), а при повороте оси *10* по часовой стрелке поднимается вверх (включено) и удерживается в этом положении защелкой. Включение и выключение производится или маховиком вручную, или автоматически при помощи специальных устройств и реле в цепи управления.

Бак снабжается краном *11* для спуска масла и указателем уровня его *12*. Так как каждая фаза имеет два разъема, то при размыкании контактов *6* и *8* образуются две электрические дуги. Вокруг них возникают два газовых пузыря паров масла, состоящих из 70—80% водорода, способствующего энергичному гашению дуги. Давление, получающееся в зоне дуги, достигает 5—10 *ат* и пере-

дается маслу, а затем корпусу бака и воздушному пространству между поверхностью масла и крышкой *2*, играющему роль буфера. Это пространство соединено с окружающим воздухом газоотводной трубой *13*. Уровень масла всегда должен поддерживаться на отметке, указанной заводом-изготовителем. В противном случае «вскипающее» масло заполняет все буферное пространство, давление в баке быстро нарастает, что может повести к взрыву масляного выключателя и воспламенению масла. Для установок на 35—220 *кв* многообъемные масляные выключатели снабжаются специальными дугогасительными камерами, помещаемыми внутри бака.

Кроме указанных масляных выключателей, широкое применение нашли малообъемные масляные выключатели. В них масло используется только для гашения дуги, а изоляция токоведущих частей производится при помощи керамических, органических изолирующих материалов и воздуха. Эти выключатели считаются взрывобезопасными, так как объем масла в них очень мал. Каждый разрыв цепи выключателя помещается в отдельный бак. Таким образом, трехфазный выключатель с одним разрывом в фазе имеет три бака, с двумя разрывами — шесть баков.

14-17. ВЫКЛЮЧАТЕЛИ НАГРУЗКИ

Выключатели нагрузки нашли применение в установках небольшой мощности на городских, сельскохозяйственных и других подстанциях, где можно ограничиться дугогасительным устройством, рассчитанным только на гашение дуги, возникшей при отключении нагрузки. Для защиты от коротких замыканий последовательно с выключателями нагрузки включаются плавкие, например кварцевые, предохранители. Выключатели нагрузки позволяют разрывать токи до 400 *а* при напряжении 6 и 10 *кв*.

На рис. 14-30, *а* показана боковая проекция выключателя, а на рис. 14-30, *б* — устройство дугогасительной камеры с применением вкладышей из органического стекла. По существу выключатель нагрузки подобен рубильнику особой конструкции и на рис. 14-30 показан во включенном состоянии.

От нижнего опорного изолятора *1* ток проходит через предохранитель *2* к подвижному контакту *3* ножа выключателя *4*. Нож состоит из двух медных полос, охватывающих

при включении неподвижные верхние рабочие контакты *5*. В выключенном состоянии нож *4* показан пунктиром. К верхней части полос ножа крепятся стальные полосы *6*, между которыми зажат дугогасительный нож *7*. Во включенном состоянии он зажат между двумя дугогасительными неподвижными контактами *9*, заключенными в пластмассовую камеру *8*. При выключении первыми размыка-

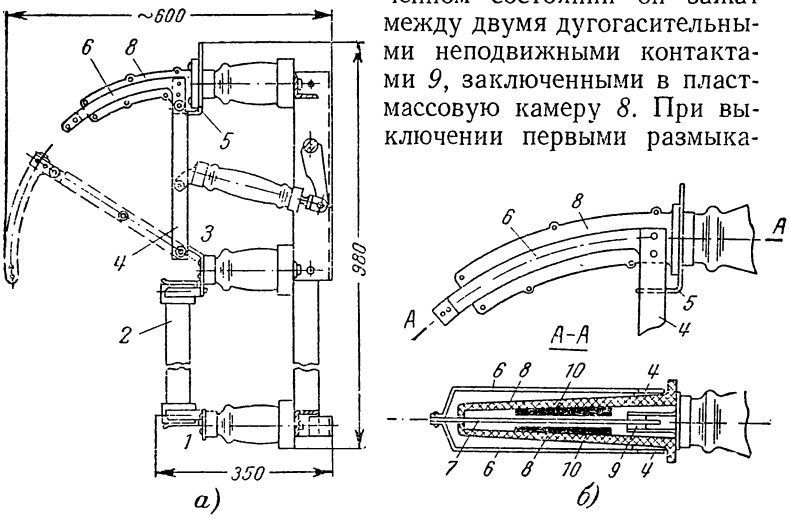


Рис. 14-30. Выключатель нагрузки.

ются неподвижный рабочий контакт *5* и нож *4*, а затем выходящий из камеры дугогасящий нож *7* отрывается от неподвижных дугогасящих контактов *9*. Возникшая в камере электрическая дуга разлагает часть органического стекла, из которого выполнены вкладыши *10*. Газ под давлением гасит дугу раньше, чем нож *7* выйдет из камеры. Управление выключателем может быть ручным и дистанционным.

14-18. МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Дроссель со стальным сердечником, показанный на рис. 14-31, имеет две обмотки. Если на зажимах обмотки *1* напряжения нет, а к обмотке *2* через сопротивление $z_п$ подано переменное напряжение $U_\sim$, то по цепи пойдет переменный ток $I_\sim$, величина которого

$$I_\sim = \frac{U_\sim}{\sqrt{(r_2 + r_п)^2 + (x_2 + x_п)^2}} \approx \frac{U_\sim}{x_2 + x_п}.$$

При неизменном насыщении стали и при $U_{\sim} = \text{const}$, $x_{\text{п}} = \text{const}$ величина тока $I_{\sim}$ также неизменна. Если к обмотке *1* подвести постоянное напряжение $U_{=}$, то постоянный ток в обмотке *1* подмагнитит сердечник и насыщение стали увеличится. Тогда индуктивность L_2 обмотки *2* и ее сопротивление x_2 уменьшаются, а ток $I_{\sim}$ возрастает. В этой схеме незначительным изменением входной мощности $P_{\text{вх}}$ обмотки *1* можно вызвать большое изменение выходной мощности $P_{\text{вых}}$ в цепи обмотки *2*. В этом смысле следует понимать «усиление». Коэффициент усиления по мощности

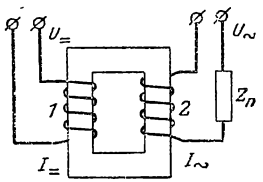


Рис. 14-31. Дроссель в режиме магнитного усилителя.

$$k_{\text{р}} = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}.$$

Таким образом, схема на рис. 14-31 представляет простейший магнитный усилитель.

В указанной схеме есть серьезный недостаток, исключающий ее применение. Переменный поток, созданный в стали, наводит в обмотке *1* переменную э. д. с., которая,

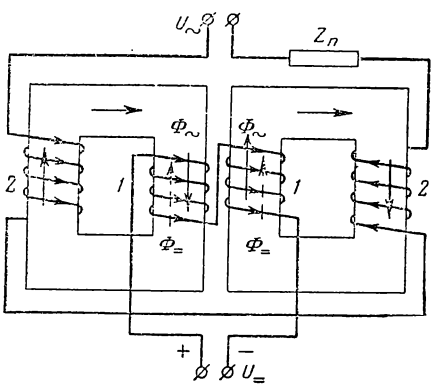


Рис. 14-32. Магнитный усилитель.

накладываясь на напряжение $U_{=}$, искажает входной сигнал. На рис. 14-32 показана другая схема, в которой подмагничивающая обмотка *1* расположена на двух стержнях, потоки которых одновременно направлены в разные стороны. В этом случае результирующая переменная э. д. с. в обеих половинах обмотки равна нулю. Практические

схемы, применяемые для измерений, управления и регулирования, обычно сложнее указанной. Магнитные усилители имеют входную мощность от долей ватта до десятка киловатт, коэффициент усиления в сложных схемах доходит до 5 000. Эти усилители долговечны и надежны в работе, так как не имеют подвижных частей. Их недостаток в большой инерционности при передаче входного сигнала.

14-19. ЗАЩИТНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В обращении с электрическими установками требуются знания и большая внимательность. Всякая небрежность и невыполнение правил техники безопасности может привести к тяжелым последствиям. При случайном прикосновении к токоведущим частям ток, проходящий через тело человека, вызывает физические и химические изменения в тканях тела и серьезные, долго незаживающие ожоги.

Особенно опасен электрический удар, при котором наблюдается потеря сознания и прекращение или нарушение деятельности органов дыхания и кровообращения. Может наступить так называемая мнимая смерть, когда человек не подает признаков жизни. Поэтому всякий, кто по роду деятельности связан, хотя бы частично, с использованием электрической энергии, обязан знать основные правила оказания помощи пострадавшему от поражения током.

Считается, что токи более 0,05 *а* опасны для жизни человека, а токи более 0,1 *а* — смертельны. Так как величина тока определяется не только напряжением, но и сопротивлением, то всякое увлажнение кожи человека и загрязнение ее проводящими веществами, а также плохая и сырая обувь увеличивают опасность поражения. Смертельные исходы наблюдались при напряжении меньшем 60 *в*. Поэтому считают сравнительно безопасным при работе с переносными лампами и приборами, в сухих помещениях с деревянными полами напряжение до 36 *в*, а при работе в сырых и жарких помещениях, при работе на металлических балках, в котлах, баках и др. напряжение до 12 *в*. В этих случаях вторичная обмотка понижающих трансформаторов обязательно заземляется.

Особенно опасным при несоблюдении техники безопасности может оказаться внутренний пробой изоляции на

корпус или между обмотками электрических машин и аппаратов. Тогда все не находящиеся нормально под напряжением части их представляют опасность для обслуживающего персонала. Для защиты человека от этой опасности применяется защитное заземление.

Электрические установки для питания источников света и электродвигателей нормально сооружаются четырехпроводными с напряжением 380/220 *в* или 220/127 *в*. Четвертый провод глухо заземляется и так как его потенциал в этом случае равен нулю, то он называется нулевым. Глухим соединение называется потому, что оно делается металлическим, с ничтожно малым переходным сопротив-

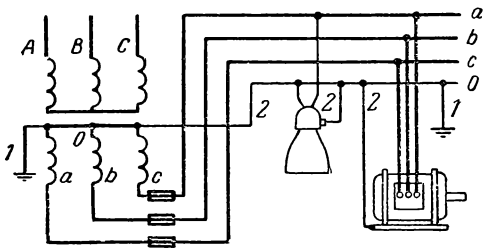


Рис. 14-33. Четырехпроводная система тока с глухозаземленной нейтралью.

лением. К нулевому проводу присоединяют корпуса электрических машин, трансформаторов, светильников, приводов электрических аппаратов, вторичные обмотки измерительных трансформаторов, металлические каркасы щитов и др. Сам нулевой провод заземляется у источника питания и у потребителя. Такая установка показана на рис. 14-33.

В этом случае, при заземлении одной из фаз, например *c*, возникнет однофазное короткое замыкание и предохранитель или автомат этой фазы отключит ее от источника питания. Напряжение фаз *a* и *b*, по отношению к земле, останется равным фазному, т. е. 220 или 127 *в*. Если человек, стоящий на земле, коснется неизолированного провода фаз *a* и *b*, то он окажется только под фазным напряжением. Если же нейтраль была бы не заземлена, то предохранитель или автомат не отключили бы заземленной фазы *c*, а человек оказался бы по отношению к фазам *a* и *b* под напряжением 380 и 220 *в*.

В этом случае защитное заземление устраивают, как показано на рис. 14-34, а сопротивление заземляющего устройства не должно превосходить 4 *ом*. Если мощность питающих сеть генераторов или трансформаторов не более 100 *ква*, то сопротивление устройства может быть до 10 *ом*.

Заземление устраивается следующим образом. З а з е м л и т е л е м *1* (рис. 14-33 и 14-34) называется металлическое тело, находящееся в непосредственном соприкосновении с землей. В первую очередь в качестве заземлителей используют металлические конструкции зданий, оборудование, надежно соединенное с землей, трубопроводы (кроме газовых и с горючими жидкостями), проложенные в земле.

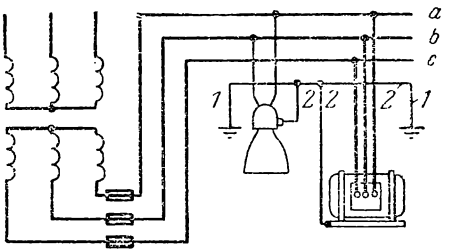


Рис. 14-34. Трехпроводная система тока с изолированной нейтралью.

Если таких конструкций нет, то заземлители делают искусственно.

Искусственные заземлители выполняют из стальных труб диаметром 35—40 *мм* с толщиной стенок не менее 3,5 *мм*, или из уголковой стали с толщиной полок не менее 4 *мм*. Число заземлителей определяется расчетом, но не должно быть менее двух. Длина заземлителей 2—3 *м*. Они забиваются в землю так, чтобы их верхний конец был ниже поверхности земли на 0,4—1,5 *м* и сваркой соединяются между собой стальными полосами толщиной не менее 4 *мм*, на глубине не менее 0,3 *м*.

Все заземляемые части электроустановок соединяют с заземлителями при помощи з а з е м л я ю щ и х п р о в о д н и к о в *2*. В качестве таких проводников также в первую очередь используются металлические конструкции зданий, металлические трубы и свинцовые и алюминиевые оболочки силовых кабелей. Искусственные заземляющие провода выполняются из стальных полос сечением не

менее 24 *мм*^{2} и толщиной не менее 3 *мм* или из круглых стальных проводов диаметром не менее 5 *мм*. Соединение этих проводников с оборудованием производится при помощи болтов или сварки. Заземляющие провода окрашивают в фиолетовый цвет.

ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОАВТОМАТИКИ

15-1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

В настоящее время основным средством, обеспечивающим технический прогресс, является механизация и автоматизация производства.

При механизации повышается производительность труда, обеспечивается снижение себестоимости, увеличение количества и улучшение качества выпускаемой продукции. Человек освобождается от тяжелого или утомительного, а иногда и опасного труда.

Автоматизация производства является более высокой ступенью развития производства. Управление и контроль в этом случае выполняют так называемые автоматические устройства. Участие человека в производстве сводится к предварительной наладке, регулировке и периодической настройке автоматического устройства.

Автоматикой называется отрасль науки и техники, изучающая средства и методы, позволяющие освободить человека от непосредственного участия в управлении машинами и механизмами.

В автоматические устройства могут входить механические, электрические, радиотехнические, гидротехнические, теплотехнические и другие аппараты и механизмы. Свойствами этой аппаратуры определяется характер работы устройства. В случае применения релейной и контакторной аппаратуры получается релейно-контакторное управление, позволяющее осуществить дистанционный автоматический пуск, торможение, защиту и останов устройства. При необходимости получить непрерывное управление и автоматическое регулирование процесса применяют электрические машины, электромашинные и магнитные

усилители, ионно-электронную аппаратуру, реле и контакторы и вычислительные устройства.

В дальнейшем рассмотрены некоторые упрощенные примеры схем пуска, защиты и автоматического регулирования.

15-2. АВТОМАТИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ПРИ ПОМОЩИ РЕЛЕ

Защита потребителя или генератора может быть построена так, что он автоматически отключается при достижении предельного значения тока, напряжения, мощности, скорости, температуры и др. Ранее, при рассмотрении магнитного пускателя (рис. 14-28) была показана защита от перегрузки при помощи тепловых реле. В данном примере (рис. 15-1) потребитель защищен при помощи двух токовых реле *Т* и одного реле времени *В*.

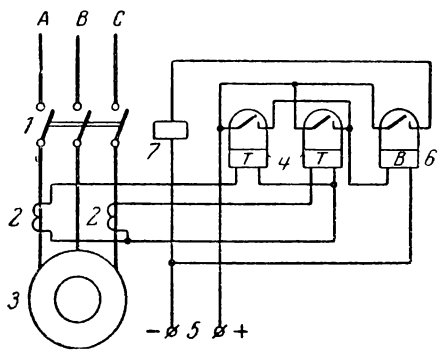


Рис. 15-1. Автоматическая защита при помощи реле.

От питающей сети *ABC* ток проходит через контакты масляного выключателя *1* и трансформатора тока *2* в статор *3* асинхронного двигателя. Если ток в одной из фаз двигателя превысит допустимое значение, то во вторичной обмотке трансформатора тока и соответствующего реле *4* ток тоже возрастает до величины срабатывания. Контакты реле замкнутся и от источника энергии *5* пойдет ток через обмотку реле времени *6*. Если время протекания тока превысит время установки реле, то его контакты тоже замкнутся. Тогда ток от источника *5*, обтекая отключающую катушку *7* масляного выключателя, разомкнет контакты главной цепи *1*.

15-3. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПУСКА ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Как известно, при пуске двигателя постоянного тока последовательно с якорем включается пусковое сопротивление, которое, по мере разгона двигателя, по частям отключается. В данном случае на рис. 15-2 это сопротивления r_1 и r_2. Выключение этих сопротивлений должно происходить автоматически. Для этого на схеме поставлены два контактора ускорения K_1 и K_2, электромагниты которых

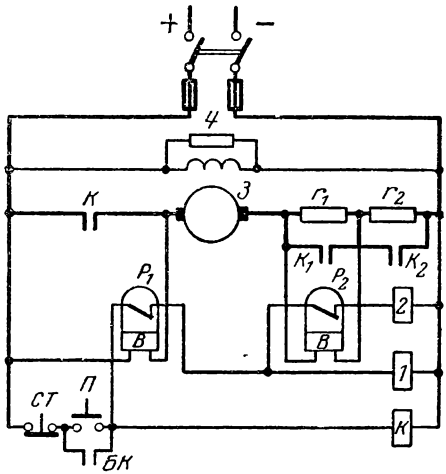


Рис. 15-2. Схема автоматического пуска двигателя постоянного тока.

управляются двумя реле ускорения P_1 и P_2, являющимися реле времени. В цепи якоря показаны линейные (рабочие) контакты контактора K, обмотка которого включена последовательно с кнопками включения $П$ и отключения $СТ$. Параллельно кнопке $П$ включены блокировочные контакты $БК$ контактора K.

При включении рубильника ток идет в обмотку возбуждения *3*, а кроме того, по обмотке реле P_1, через якорь и сопротивления r_1 и r_2. Этот ток очень мал и двигатель остается неподвижным. Однако под влиянием этого тока реле P_1 срабатывает и его контакты размыкаются. Реле P_2 разомкнуть контакты не может, так как снимаемое напряжение с сопротивления r_1 при очень малом токе ничтожно.

Если нажать кнопку *П*, то от зажима «плюс» ток пойдет в обмотку линейного контактора *К*. При этом одновременно замкнутся рабочие контакты *К* и блок-контакты *БК*. Кнопка *П* может быть отпущена.

Через якорь и сопротивления r_1 и r_2 пойдет пусковой ток $I_п$ и якорь начнет вращаться. Падение напряжения на сопротивлении r_1 становится достаточным для того, чтобы ток, ответвляющийся в обмотку реле P_2, заставил его сработать и разомкнуть контакты. Обмотка реле P_1 оказывается шунтированной контактами контактора *К* и через некоторое, заранее установленное время ток в обмотке так уменьшится, что его контакты замкнутся. Тогда через обмотку *1* контактора K_1 пойдет ток и контактор сработает, замкнув накоротко сопротивление r_1.

Таким образом, часть сопротивления в цепи якоря оказывается выключенной и ток снова возрастет до величины $I_п$. Так как падение напряжения Ir_1 стало равно нулю, то обмотка реле P_2 не сможет удерживать контакты реле разомкнутыми и через некоторое время контакты его замкнутся. Тогда ток станет обтекать обмотку контактора *2* и она замкнет контакты K_2, шунтирующие сопротивление r_2. Этим заканчивается пуск. Для останова двигателя достаточно нажать кнопку *СТ*. Сопротивление *4*, шунтирующее обмотку возбуждения, называется р а з р я д н ы м, и численно равно (4—5) $r_в$. Оно предохраняет обмотку от пробоя, при случайном обрыве цепи возбуждения.

15-4. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ СХЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Построение схемы автоматического регулирующего устройства рассматривается на простейшем примере поддержания постоянства напряжения трехфазного синхронного генератора при изменении нагрузки. На рис. 15-3 показан генератор *1*, напряжение которого *U* следует поддерживать постоянным.

Машина или аппарат, который подвергается регулированию, называется р е г у л и р у е м ы м о б ъ е к т о м. В данном случае это генератор *1*. Физическая величина, которая подвергается регулированию, называется р е г у л и р у е м ы м п а р а м е т р о м. Это будет напряжение *U*. Напряжение изменяется под воздействием тока *I*.

Внешнее воздействие, под влиянием которого изменяется регулируемый параметр, называется возмущающим воздействием.

Когда напряжение регулирует рабочий, он получает информацию об изменении напряжения от датчика сигналов, каковым является в данном случае вольтметр *2*. Сравнив показания вольтметра с заданной величиной напряжения рабочий изменяет величину сопротивления реостата возбуждения *5* и тем воздействует на генератор, восстанавливая прежнюю величину напряжения.

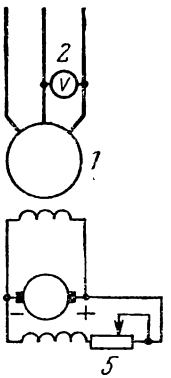


Рис. 15-3. Схема ручного регулирования напряжения генератора.

Для установления назначения и взаимной связи отдельных элементов регулирующего устройства пользуются условными схемами, называемыми структурными.

Структурная схема регулирования напряжения генератора показана на рис. 15-4. Возмущающее воздействие *B*, т. е. ток, изменяет регулируемый параметр *U* регулируемого объекта *1*, т. е. генератора. Последовательность воздействий показана стрелками. Генератор через датчик *2*, т. е. вольтметр, передает сигнал об изменении напряжения рабочему *3—4*. Рабочий, изменяя сопротивление *5*, воздействует на регулируемый объект *1*.

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что последовательная цепь воздействий на рис. 15-4 образует замкнутый контур, т. е. от генератора *1* обратно к генератору *1*. Такая связь конечного элемента цепи с начальным носит название обратной связи. Показанную на рис. 15-4 обратную связь можно назвать основной, в отличие от дополнительных обратных связей, которые можно делать в схемах и о которых сказано будет ниже.

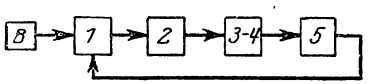


Рис. 15-4. Структурная схема ручного регулирования напряжения генератора.

На рис. 15-5 показана схема автоматического регулирования напряжения генератора в том случае, если человек совершенно устранен от процесса регулирования.

Возмущающее воздействие *В* изменяет регулируемый параметр *U* регулируемого объекта *1*. Последний передает сигнал об изменении *U* элементу схемы *2*. Тот элемент, которому передается сигнал об изменении регулируемого параметра, называется измерительным элементом. Он сравнивает значение параметра с заданным значением, вырабатывает сигнал по разнице значений и передает его следующим элементам схемы. В измерительном элементе должна быть предусмотрена возможность настройки (*Н*), так как значения регулируемого параметра могут быть заданы разными.

Во многих случаях сигнал, переданный измерительным элементом следующим элементам схемы, желательно пре-

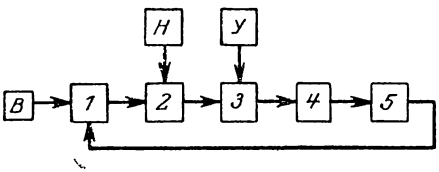


Рис. 15-5. Структурная схема автоматического регулирования напряжения генератора.

образовать: например сигнал постоянного тока — в сигнал переменного тока. Поэтому элемент *3* схемы, который преобразовывает один вид сигнала в другой, называется преобразующим элементом.

Очень часто полученный элементом *3* сигнал очень слаб и недостаточен для приведения в действие следующих элементов схемы. Тогда в элементе *3* предусматривается дополнительный ввод энергии (*У*). В этом случае элемент схемы, преобразующий и одновременно усиливающий сигнал, называется усилительным элементом.

Теперь сигнал должен быть передан следующему элементу схемы *4*, который будет исполнять сигнал, например перемещать ручку регулировочного реостата в схеме. Это может быть двигатель любой системы. Элемент схемы, выполняющий действие под влиянием сигнала, называется исполнительным элементом.

Последний элемент *5*, воздействующий на регулируемый объект *1*, называется регулирующим эле-

ментом. Это будет регулировочный реостат в цепи возбуждения генератора.

Показанная на рис. 15-5 схема является только примерной.

15-5. СХЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА

На рис. 15-6 представлен синхронный генератор *1*, обмотка возбуждения *2* которого питается от возбудителя *3*. Обмотка возбуждения возбудителя *4* присоединена к зажимам якоря возбудителя последовательно с реостатом — угольным столбиком *5*, набранным из тонких, угольных шайб. Сила растянутой пружины *6* поворачивает рычаг *7* вокруг неподвижной опоры и при помощи штыря *8*, проходящего сквозь угольные шайбы, сжимает эти шайбы, уменьшая сопротивление столбика *5*. С другой стороны, электромагнит *9*, притягивая конец рычага *7*, поднимает штырь *8* и, ослабляя давление на столбик *5*, увеличивает его сопротивление. Обмотка электромагнита *9* питается от селенового выпрямителя *10* выпрямленным током генератора *1*. Настройка автоматического регулятора для поддержания заданного напряжения генератора производится изменением сопротивления *11*.

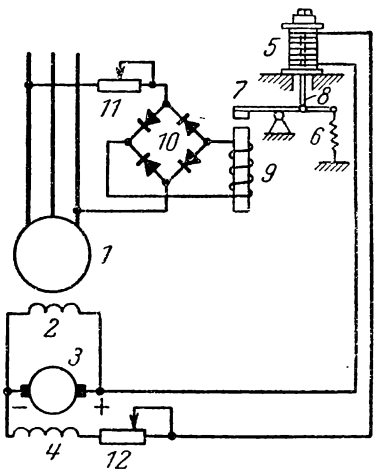


Рис. 15-6. Схема автоматического регулирования напряжения генератора.

При увеличении напряжения генератора под влиянием уменьшения нагрузки ток в обмотке электромагнита *9* увеличивается, сила давления на столбик *5* уменьшается, сопротивление его возрастает и ток возбуждения возбудителя *3* уменьшается. Как следствие этого, уменьшается ток в обмотке возбуждения *2* генератора и напряжение его падает, приближаясь к исходному. Наоборот, при

уменьшении напряжения генератора регулятор стремится его повысить.

Структурная схема регулятора, соответственно рис. 15-6, показана на рис. 15-7. На обеих схемах регулируемый объект — генератор *1*, регулируемый параметр — напряжение генератора U, измерительный элемент — выпрямитель *10*, электромагнит *9* и пружина *6*, регулирующий элемент — угольный столбик *5*. Настройка производится изменением сопротивления *11*. Возбудитель *3*, *4* и реостат *12* относятся к регулируемому объекту.

Системы, аналогичные рассмотренным на рис. 15-6, называются системами прямого действия, так как измерительный элемент *10—9—6* действует непосредственно (прямо) на регулирующий элемент *5*. Применяются они тогда, когда усилие, развиваемое сигналом измерительного элемента, достаточно для приведения в действие регулирующего элемента.

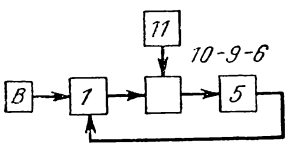


Рис. 15-7. Структурная схема регулирования соответственно рис. 15-6.

Когда под влиянием возмущающего воздействия напряжение генератора меняется, то получается разность между напряжением генератора и его номинальным значением. Эта разность называется рассогласованием системы. Регулятор должен свести эту разность к нулю, т. е. напряжение должно оставаться постоянным. Поэтому системы регулирования, действующие подобно представленной на рис. 15-6, называются системами регулирования постоянного параметра.

Однако система автоматического регулирования прямого действия не в состоянии возвратить изменившуюся под влиянием нагрузки величину напряжения точно к исходному значению. Действительно, если, например, при уменьшении тока генератора напряжение возросло, то для поддержания напряжения неизменным ток возбуждения должен быть уменьшен. Значит, при новой, меньшей нагрузке автомат устанавливает меньший ток возбуждения, чем до начала регулирования. Для этого сопротивление столбика *5* (рис. 15-6) должно быть больше, а суммарное давление на столбике меньше. Это возможно только при большем тяговом усилии обмотки электромагнита *9*. Но усилие, развиваемое электромагнитом, пропорционально приложенному

к его обмотке напряжению. Следовательно, напряжение генератора, по окончании режима регулирования, будет несколько больше, чем до начала регулирования.

Таким же образом, при увеличении нагрузки автомат повышает упавшее напряжение до величины несколько меньшей, чем до начала регулирования.

Системы, регулирующие по этому принципу, называются статическими. В них под влиянием возмущения регулируемый параметр не сохраняет точно постоянную величину, а принимает некоторые значения в заранее заданных пределах.

Если, например, при изменении тока от $I_{мин}$ до $I_{макс}$ напряжение меняется в пределах от $U_{макс}$ до $U_{мин}$, то отношение

$$\delta = \frac{U_{макс} - U_{мин}}{U_н}$$

называют статизмом. Чем меньше статизм, тем точнее регулятор поддерживает заданное напряжение.

15-6. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

При автоматическом регулировании, помимо статизма, обнаруживается еще один отрицательный фактор. На рис. 15-8, *а* показана диаграмма внезапного уменьшения тока генератора с величины I_1 до величины I_2. При этом напряжение U_1 (рис. 15-8, *б*), в результате статизма регулятора, в конечном счете устанавливается равным $U_2 > U_1$. Однако, кроме того, оно принимает величину U_2 не сразу, а после некоторого числа колебаний, которые при неудачной конструкции регулятора могут иметь недопустимую амплитуду и длительность. Эти колебания обусловлены механической и электромагнитной инерцией всех частей устройства, входящих в систему регулирования.

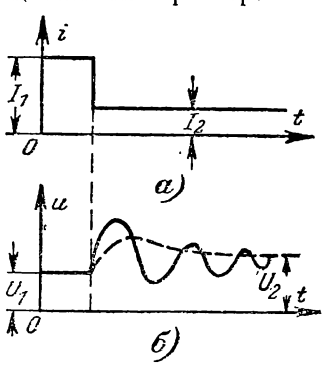


Рис. 15-8. Колебания напряжения при автоматическом регулировании.

Поэтому в автоматических регуляторах предусматриваются меры, которые, не увеличивая статизм устройства, возможно быстро подавляли бы эти колебания. Одной из

таких мер является о б р а т н а я с в я з ь регулирующих устройств.

На рис. 15-9 представлено изменение структурной схемы рис. 15-7. На нем, кроме основной обратной связи между регулирующим элементом *5* и регулируемым объектом *1*, введена дополнительная обратная связь *ОС* между измерительным элементом *10—9—6* и регулируемым объектом *1*. При автоматическом регулировании под обратной связью обычно понимают только эту дополнительную обратную связь.

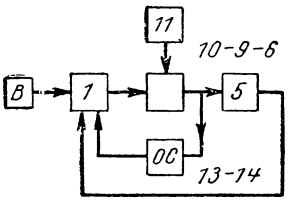


Рис. 15-9. Структурная схема регулирования при наличии обратной связи.

О б р а т н о й с в я з ь ю называют воздействие, пропорциональное выходному сигналу или скорости изменения сигнала любого элемента схемы, передаваемое любому предыдущему элементу так, что образуется дополнительный замкнутый контур.

Воздействуя на регулируемый объект по более короткому пути, обратная связь увеличивает скорость отработки схемы, т. е. быстродействие уменьшает первоначальный бросок напряжения и быстро подавляет его колебания.

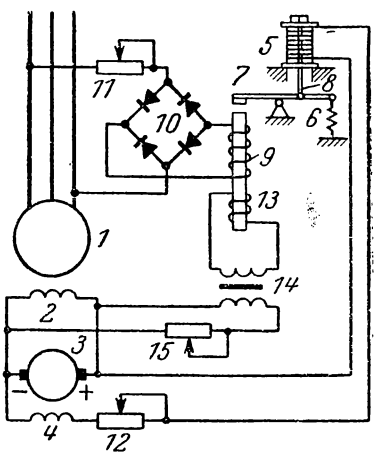


Рис. 15-10. Регулятор напряжения с обратной связью.

Обратные связи существуют не только в создаваемых человеком механизмах, они действуют во всех живых организмах природы и в организме человека. Нарушение обратных связей в организме вследствие каких-либо причин ведет к нарушению жизнедеятельности организма.

Один из способов осуществления обратной связи показан на рис. 15-10. Она осуществлена, согласно схеме рис. 15-9, между измерительным элементом *10—9—6* и регулируемым объектом. Связь состоит из добавочной обмотки обратной связи *13* в электромагните и трансфор-

матора обратной связи *14*. Первичная обмотка трансформатора приключена к зажимам возбудителя, а вторичная — к обмотке *13*. Сопротивление *15* служит для настройки обратной связи.

Когда напряжение U генератора *1* постоянно, то напряжение возбудителя тоже неизменно и в первичной обмотке трансформатора *13* проходит постоянный ток. Во вторичной обмотке трансформатора и обмотке *13* тока не создается. Если напряжение генератора стало возрастать, то, как показано ранее, напряжение возбудителя начинает уменьшаться и в первичной обмотке трансформатора ток начинает изменяться. Как следствие этого, возникает ток во вторичной обмотке трансформатора и в обмотке электромагнита *13*.

Обмотки *9* и *13* намотаны так, что тяговые усилия их складываются и поэтому давление на столбик *5* уменьшается быстрее, чем без обратной связи. В связи с этим напряжение возбудителя и ток в обмотке возбуждения *2* генератора падают быстрее и первоначальный бросок напряжения меньше. Колебаний напряжения почти не происходит и график изменения его (рис. 15-8,*б*) представляет апериодическую кривую, показанную пунктиром. Таким образом, регулятор быстрее реагирует на изменение режима.

15-7. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОМАШИННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Электромашинные усилители (ЭМУ) находят большое применение в замкнутых схемах автоматического регулирования. В данном случае на рис. 15-11 показано применение ЭМУ для автоматического регулирования напряжения генератора. Якорь генератора постоянного тока *1* приводится во вращение первичным двигателем, не показанным на рисунке. Обмотка возбуждения генератора *2* включена на зажимы ЭМУ *3*, приводимого своим асинхронным двигателем *4*. Обмотка возбуждения ЭМУ *5* питается от источника постоянного тока через регулирующее сопротивление *6*. Эта обмотка называется в данном случае з а д а ю щ е й, так как, регулируя ток, изменением сопротивления *6* можно изменять ток якоря ЭМУ и обмотки возбуждения генератора *2*, а значит, и его напряжения.

Вторая обмотка ЭМУ *7*, называемая о б м о т к о й управления, присоединяется на зажимы якоря генератора. Намагничивающие силы обмоток *5* и *7* направлены встречно

и таким образом результирующая н. с. $F_р = F_5 - F_7$. Если напряжение генератора падает, то уменьшается ток в обмотке управления *7*, а результирующая н. с. возрастает. Ток в обмотке возбуждения *2* увеличивается и напряжение генератора возрастает до величины, близкой к первоначальной. Если напряжение генератора возрастает, то регулятор снижает его также до величины, близкой к исходной.

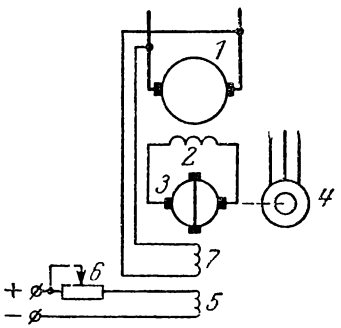


Рис. 15-11. Регулирование напряжения генератора при помощи ЭМУ.

В данном случае обмотка *7* осуществляет обратную связь по напряжению между выходной величиной — напряжением U и входной величиной — током возбуждения ($I_в$). Эта обратная связь называется отрицательной, так как уменьшение выходной величины вызывает увеличение входной величины и обратно. Легко видеть, что на схеме, представленной на рис. 15-10, обратная связь была также отрицательной. Исключительно большое применение в различных схемах регулирования отрицательных обратных связей объясняется способностью таких схем к саморегулированию.

15-8. СХЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

На рис. 15-12 показана схема генератор-двигатель (ГД). Якорь генератора *1* и якорь ЭМУ *2* приводятся во вращение асинхронными двигателями. Тахогенератор *3* механически связан с якорем двигателя постоянного тока *4*, приводящего во вращение машину-орудие. Ток в обмотку возбуждения двигателя *5* поступает от сети с постоянным напряжением, а обмотка возбуждения генератора *6* подключена к той же сети последовательно с якорем ЭМУ *2*.

Обмотка управления ЭМУ *7* совмещает в этой схеме функции задающей обмотки и обмотки обратной связи по скорости, так как ее ток определяется напряжением, снимаемым с делителя *8* и э. д. с. тахогенератора *3*. Таким образом, $E_7 = U_8 - E_3$.

Схема настроена так, что при нормальной скорости вращения якоря двигателя *4* напряжение $U_в = E_з$, а напряжение на обмотке возбуждения ЭМУ равно нулю. Если скорость понизилась, то $E_з < U_в$, возбудившийся ЭМУ по-

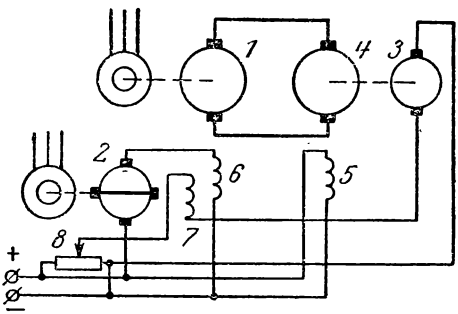


Рис. 15-12. Схема стабилизации скорости вращения двигателя постоянного тока.

шлет дополнительный ток в обмотку возбуждения генератора *6* и скорость двигателя возрастет. При повышении скорости двигателя явления протекают в обратном порядке. Произвольное регулирование скорости двигателя *4* осуществляется перемещением движка потенциометра *8*.

15-9. СИНХРОННО-СЛЕДЯЩИЙ ПРИВОД

К автоматическим устройствам относятся так называемые следящие системы. Если нужно следить за какой-либо физической величиной, изменяющейся по закону, который заранее невозможно предвидеть, то создается система, непрерывно и точно «следящая» за изменением этой величины и производящая действия в зависимости от изменения физической величины. Такая система называется следящей.

Ранее было показано (§ 12-12), что сельсины применяются в следящих системах. За углом поворота сельсина-датчика непрерывно следит сельсин-приемник и выполняет поворот на тот же угол. Однако, когда для отработки угла поворота требуется большое усилие, схема, представленная на рис. 12-25, непригодна.

Упрощенная схема следящего устройства с использованием сельсинов показана на рис. 15-13. Сельсин-датчик,

статор которого присоединен к сети переменного тока, не входит в систему регулирования, а принадлежит к так называемому задающему устройству (ЗУ), по заданию которого схема приходит в действие. Ротор этого сельсина электрически соединен с ротором сельсина-приемника *1*, являющегося измерительным элементом схемы, механически связанным с регулируемым объектом *5*. Статор сельсина-приемника, в отличие от показанного на рис. 11-25, присоединен не к сети переменного тока, а к усилительному устройству *2* и представляет собой вторичную обмотку трансформатора, первичной обмоткой которого является обмотка ротора. Усилительное устройство питает управляющую обмотку двухфазного исполнительного двигателя переменного тока *3*, вторая обмотка которого присоединена к сети. При помощи редуктора *4* исполнительный двигатель механически связан с объектом регулирования *5*. Структурная схема устройства показана на рис. 15-14.

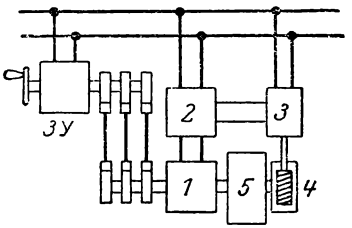


Рис. 15-13. Схема работы следящего устройства.

Если задающее устройство ЗУ поворачивает ротор сельсина-датчика, то благодаря углу рассогласования θ обмотка ротора-приемника *1* обтекается током. Сигнал, после усиления усилителем *2*, поступает в управляющую обмотку исполнительного двигателя *3* и последний при помощи редуктора *4* поворачивает регулируемый объект *5*, а вместе с ним и ротор сельсина-приемника *1* до отработки угла рассогласования θ. Таким образом, происходит непрерывная отработка угла θ.

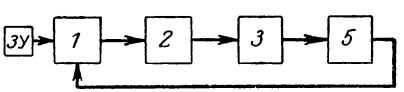


Рис. 15-14. Структурная схема соответственно рис. 15-13.

На рис. 15-15 показана электромеханическая следящая система, которая преобразует сигнал, полученный в виде входного напряжения $U_{вх}$, в угол поворота вала. В этой схеме на усилитель *1* подается разность напряжений ΔU входного напряжения $U_{вх}$ и напряжения $U_д$, получаемого

от делителя напряжения *2*, приключенного к сети со стабилизированным напряжением $U_с$, т. е. $\Delta U = U_{вх} - U_д$. Это напряжение подается на входные зажимы усилителя *1*, которое после усиления подводится к зажимам исполнительного двигателя *3*, перемещающего движок делителя *4*.

Если $U_{вх} = U_д$, то $\Delta U = 0$ и двигатель неподвижен. В это время угол поворота пропорционален входному напряжению. Применяемый здесь делитель — линейный и его напряжение пропорционально перемещению движка *4*, т. е. углу поворота вала двигателя. Когда $U_{вх}$ изменится, то появится напряжение ΔU и двигатель, вращаясь, переместит движок в новое положение, при котором опять $\Delta U = 0$. Новый угол поворота пропорционален новому входному напряжению.

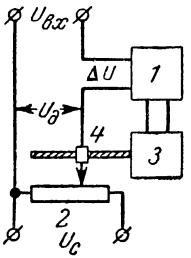


Рис. 15-15. Преобразование сигнала следящей системой.

При непрерывном изменении $U_{вх}$ двигатель непрерывно следит за изменением сигнала, поворачиваясь на пропорциональную сигналу величину. Сигнал $U_{вх}$ получается от вычислительного устройства, наблюдающего за перемещением, например самолета, ракеты и др., а следящая система наводит на цель средства обороны.

ГЛАВА ШЕСТНАДЦАТАЯ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

16-1. НАЗНАЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Последнее десятилетие характеризуется бурным развитием электронной вычислительной техники и внедрением ее во все отрасли народного хозяйства. Электронные вычислительные устройства (ЭВУ) позволили успешно решать такие сложные задачи, как запуск искусственных спутников земли, космических кораблей, введение в действие атомных реакторов, предсказание погоды и много других, прежде неразрешимых задач. В настоящее время эти устройства находят все большее применение в планировании и управлении народного хозяйства; успешно разрешаются такие задачи, как получение максимального технического и экономического успеха при минимальных затратах труда и

материальных средств. Лабораториями экономико-математических исследований Академии наук СССР решены, например, такие задачи, как определение оптимального варианта развития шахт Кузбасса на 1964—1970 гг. и размещения цементных заводов Сибири и Дальнего Востока на 1970 г. В химической, металлургической и других отраслях промышленности страны производятся работы по автоматизированной системе управления технологическими процессами, на базе вычислительных устройств. Применение вычислительной техники в сельском хозяйстве позволит осуществлять систематический анализ почв, определять необходимое количество удобрений и находить рациональное размещение сельскохозяйственных культур по районам страны. Получены обнадеживающие результаты применения электронных вычислительных устройств в медицине и, конечно, эти устройства нашли широкое применение в оборонной технике.

Успехи применения ЭВУ объясняются все возрастающим их быстродействием. Дело в том, что выполнение многих технических и народнохозяйственных задач требует решения сложных уравнений со многими неизвестными в короткий срок (прогнозы погоды, направление хода производственного процесса, вычисление траекторий спутников земли, ракет и др.). Решение этих уравнений, зачастую, возможно только путем разложения их на огромное число простейших операций, выполнение которых требует такого большого времени, что полученные результаты оказываются бесполезными. Только ЭВУ позволяют в этих случаях получать ответ своевременно. Если лет десять тому назад выполнение ЭВУ 2 000—4 000 математических операций в секунду считалось высоким показателем, то в настоящее время серийно изготовляемые ЭВУ производят десятки тысяч и более операций в секунду, а в некоторых ЭВУ оно достигает сотен тысяч операций в секунду.

Ниже даются лишь основные понятия о назначении и работе некоторых элементов ЭВУ.

16-2. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Вычислительные устройства можно разделить на две группы: вычислительные устройства непрерывного действия или аналоговые вычислительные устройства (АВУ) (называемые иногда модели-

рующими) и цифровые вычислительные устройства (ЦВУ). На рис. 16-1 показано изображение одной и той же величины (напряжения) полученной двумя способами. В первом способе величина напряжения, например 219,5 *в*, измеряется стрелочным вольтметром. Измерение производится непрерывно и два ближайших значения измеряемой величины могут отличаться друг от друга на любую малую величину. Во втором способе над числами, представленными цифрами, в определенном порядке производятся арифметические действия и результат выдается числом. В этом случае отличие одного значения меняющейся

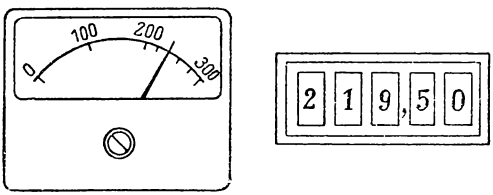


Рис. 16-1. Измерение величины приборами непрерывного и дискретного действия.

величины от другого зависит от числа разрядов, предусмотренных в вычислительном устройстве. Так, например, если для целых чисел предусмотрены три разряда, а для дробных — два, то в десятичной системе два ближайших значения величины будут отличаться друг от друга на одну сотую, т. е. 219,50; 219,51; 219,52. В АВУ точность решения ограничена точностью входящих в нее элементов (в данном случае вольтметра), а в ЦВУ она зависит только от количества разрядов в изображении числа и может быть очень большой. Скорость решения задачи в АВУ больше, чем в ЦВУ; они проще последних, но не могут быть универсальными, а приспособлены для решения задач одного типа. Цифровые вычислительные устройства, сочетающие большую точность с высокой скоростью работы, универсальны, что дает возможность их применения в различных областях науки, техники, медицины и экономики.

16-3. АНАЛОГОВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Прежде чем строить любой дорогостоящий объект (машину, самолет, плотину, корабль), необходимо быть уверенным в том, что она оправдает показатели, полученные

расчетом. Если точный расчет произвести нельзя, то надо строить опытный образец и его испытать. Такой метод обходится дорого, иногда вовсе невыполним, а часто связан с опасностью для жизни человека. Поэтому предпочитают строить модель аналогичную (подобную) объекту и производить ее испытание. Строят модель самолета, корабля, плотины и др. и испытывают их в обычной для них среде (аэродинамическая труба, канал и др.). Такое физическое моделирование обходится дорого и часто затруднительно в выполнении, особенно при моделировании тепловых и динамических процессов.

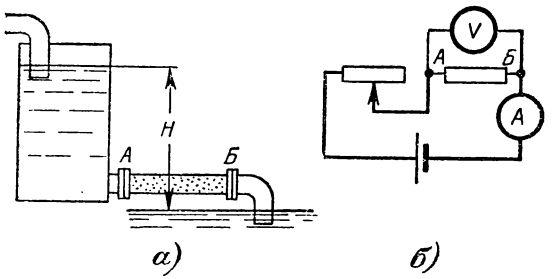


Рис. 16-2. Электрическая схема, моделирующая гидравлическую установку.

В этих случаях пользуются методом математического моделирования, когда подбирается модель, действия которой описываются формулами, однотипными с формулами действия предполагаемого объекта.

Например, количество воды $Q_в$, фильтрующееся за время t через трубу $АБ$, заполненную песком (рис. 16-2, *а*) и имеющую гидравлическое сопротивление $r_г$, при разности уровней воды H равно

$$Q_в = \frac{H}{r_г} t.$$

Но аналогичной формулой определяется количество электричества, проходящего через участок цепи $АБ$ за время t (рис. 16-2, *б*):

$$Q_э = \frac{U_{АБ}}{r_э} t.$$

Таким образом, явления, происходящие в этих установках, описываются одной формулой, но для производства испыта-

ния более удобна электрическая схема. Поэтому ее можно считать моделью гидравлической установки, показанной на рис. 16-2, *а*, хотя построена она на другой физической основе. В практике многие задачи математически определяются сложными уравнениями, решение которых требует огромного труда и времени. К этим задачам и применяется метод математического моделирования на электротехнической основе, как наиболее пригодной.

На рис. 16-3, *а* показана плотина, которую следует построить на водопроницаемом грунте. Вода будет фильтроваться сквозь грунт и может вызвать разрушение плотины. Должны быть произведены сложные и длительные расчеты для определения напоров и скоростей фильтрации воды, а построение физической модели зачастую затруднительно и дорого. Если по форме основания предполагаемой плотины вырезать лист электропроводящей бумаги *1* (рис. 16-3, *б*) и приложить разность потенциалов $U_{ВН}$, имитирующую разность напоров воды $H_В - H_Н$, то, измеряя щупом *2* потенциалы в разных точках модели, можно получить величины, пропорциональные напорам в разных точках грунта под плотиной. При этом наносятся линии равных напоров (потенциалов) без решения уравнений. При дальнейшем усовершенствовании модели электропроводящая бумага была заменена сеткой, состоящей из миниатюрных сопротивлений, которые позволили имитировать сопротивления фильтрации разных мест неоднородного грунта.

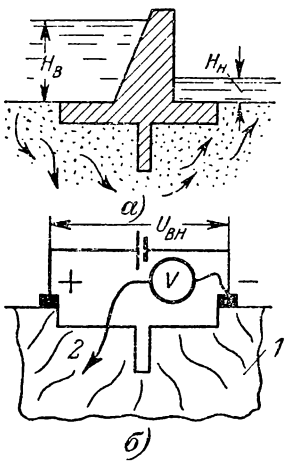


Рис. 16-3. Определение напоров фильтрации воды в грунте под плотиной при помощи электрической модели.

16-4. ВЫЧИСЛЕНИЯ В МОДЕЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ ПРИ ПОМОЩИ ПОТЕНЦИОМЕТРОВ

В автоматических устройствах и следящих системах сигналы, получаемые от датчиков, подвергаются различным преобразованиям (§ 12-9, 12-10, 12-11, 15-9): сложению, вычитанию, умножению, делению, дифференцированию,

интегрированию и решению уравнений, причем все это должно выполняться быстро и непрерывно. Такие операции выполняют вычислительные устройства непрерывного действия.

На рис. 16-4 показано устройство потенциометра, служащего для преобразования механической величины (угол поворота) в электрическую, выполнения операций умножения и деления, а в следящих системах для преобразования сигнала напряжения в угол поворота. На изолирующем каркасе *1* навит провод высокого удельного сопротивления.

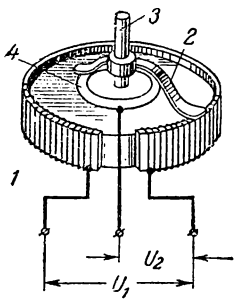


Рис. 16-4. Устройство потенциометра.

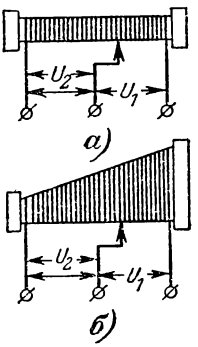


Рис. 16-5. Формы каркасов потенциометров.

Щетка *2* при повороте оси *3* скользит по оголенной поверхности провода и по контактному кольцу *4*. Таким образом, напряжение U_1, подводимое к концам провода, делится щеткой *2* на U_2 и $U_1 - U_2$. Каркас потенциометра показан развернутым на рис. 16-5, *а*. Такой потенциометр, у которого ширина каркаса неизменна, называется линейным, так как

$$U_2 = U_1 \frac{\alpha}{\alpha_м} = U_1 x, \qquad (16\text{-}1)$$

где α и $\alpha_м$ — угол поворота щетки и его максимальное значение, а x — долевое значение угла α. Если $x = \text{const}$, то потенциометр служит блоком умножения на постоянный коэффициент, меньший единицы. Этот потенциометр служит также блоком умножения двух переменных величин U_1 и x, если α и U_1 меняются.

Очень часто в автоматических вычислительных устройствах потенциометр должен дать нелинейную зависимость между углом поворота и выходным напряжением. Тогда каркас должен иметь другую форму. Если $r_м$ и r — полное сопротивление потенциометра и часть его, то

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{r}{r_м} = f(x).$$

После дифференцирования по x первая производная равна:

$$\frac{1}{r_м}\frac{\Delta r}{\Delta x} = f'(x); \qquad (16\text{-}2)$$

$$\Delta r = \rho\frac{\Delta l}{q} = \rho\frac{2y\Delta w}{q} = \rho\frac{2yw_м\Delta x}{q},$$

где Δr, ρ, Δl, q, y, Δw, $w_м$ — изменение сопротивления, удельное сопротивление, изменение длины провода, сечение провода, ширина каркаса, изменение числа витков провода, полное число витков провода при перемещении щетки на расстояние Δx.

Тогда ширина каркаса

$$y = \frac{r_м q}{2\rho w_м} f'(x) = kf'(x), \qquad (16\text{-}3)$$

т. е. форма каркаса есть функция, пропорциональная производной заданной функции.

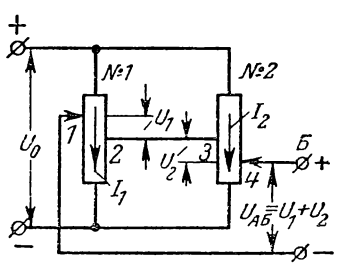


Рис. 16-6. Схема сложения напряжений при помощи потенциометров.

Если $f(x) = x$, то каркас должен быть прямоугольным, так как $f'(x) = 1$; для $f(x) = x^2$ каркас имеет треугольную форму, так как $f'(x) = 2x$, что и показано на рис. 16-5, *б* и т. д. Такие потенциометры называются функциональными.

На рис. 16-6 показано преобразование входных механических сигналов — перемещения движков потенциометров в выходные сигналы — напряжения и одновременное сложение этих напряжений на выходе схемы *АБ*. Потенциометры № *1* и № *2* присоединены к источнику энергии со стабилизированным напряжением U_0, а средние точки их соединены накоротко. По потенциометрам проходят токи I_1 и I_2. В фазе с токами будут падения напряжения $U_1 = I_1 r_1$ и $U_2 = I_2 r_2$, где r_1 и r_2 — части сопротивлений между движ-

ком и средними точками потенциометров. Если обойти контур между точками выхода A и $Б$ в направлении $A—1—2—3—4—Б$, то легко понять, что $U_{АБ} = U_1 + U_2$, и по сопротивлению какого-либо следующего каскада устройства $r_н$ пойдет ток от зажима $Б$ к зажиму A. Когда движки стоят против средних точек, $U_{АБ} = 0$.

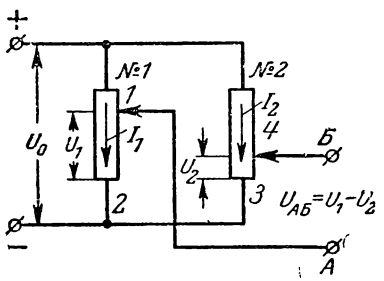


Рис. 16-7. Схема вычитания напряжений при помощи потенциометров.

На рис. 16-7 показана схема соединения потенциометров для получения разности напряжений $U_{АБ} = U_1 — U_2$, так как падения напряжения потенциометров при обходе контура $A—1—2—3—4—Б$ вычитаются друг из друга.

Все приведенные выше вычислительные устройства непрерывного действия имеют общие существенные недостатки: влияние нагрузки на величину выходного напряжения, малую точность вычислений и ограниченное число выполнимых математических операций. Эти недостатки устранены в современных АВУ применением так называемых р е ш а ю щ и х (о п е р а ц и о н н ы х) у с и л и т е л е й, получаемых на базе реостатных усилителей постоянного тока (УПТ), (§ 13-11), описание которых выходит за рамки этой книги.

16-5. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ (ЦВУ)

В некоторых случаях исследовать различные процессы в областях науки и техники при помощи моделей нецелесообразно. Кроме того, точность решения в АВУ, зависящая от точности входящих в них элементов, составляет несколько процентов. Однако при решении ряда вопросов допустимая погрешность должна быть в миллионы и миллиарды раз меньшей (расчет траекторий снарядов, ракет, спутников, планет). В ЦВУ точность решения может быть любой, так как она определяется только количеством разрядов чисел, на которое рассчитано устройство. Цифровые вычислительные устройства универсальны и могут применяться в любой области науки, техники, медицины, эконо-

мики и т. д. Эти устройства, кроме чисто вычислительных операций, могут решать логические задачи: определять знак произведения чисел, выделять части числа и составлять из них новые числа, переводить текст с одного языка на другой, решать шахматные этюды, подбирать библиографическую литературу и др.

Цифровые вычислительные устройства могут выполнять только те логические операции, которые выполняются человеком по установленным правилам и называются формальными видами умственного труда. Современные ЦВУ с применением электронной техники явились логическим продолжением механических вычислительных устройств.

16-6. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ЦВУ

Для решения всех задач одного типа (сложения двух многозначных чисел, извлечения квадратного корня и т. д.) можно составить точное предписание о выполнении, в определенном порядке, системы простейших операций, приводящих к результату. Такое предписание называется а л г о р и т м о м.

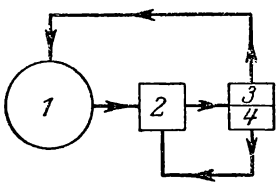


Рис. 16-8. Структурная схема работы человека-вычислителя.

Сам термин происходит от имени средневекового узбекского математика Аль-Хорезми, который в IX веке дал правила для составления таких предписаний. Смысл предписаний в том, что они могут быть выполнены человеком без всякого понимания сути дела. От человека требуется машинальное, но точное выполнение простейших немногочисленных операций. А раз это так, то при современном состоянии электронной техники человека может заменить устройство, которое, с недостижимой для человека быстротой, сможет решить задачу, если это устройство снабдить алгоритмом, называемым в данном случае п р о г р а м м о й.

На рис. 16-8 показана структурная схема работы человека-вычислителя. В процессе работы вычислитель *1* для выполнения каждого действия пользуется программой 3, записанной при помощи цифр, букв, знаков алгебраических операций и др. По этим сведениям он производит вычисления на бумаге, на счетах или арифмометре, т. е. вводит в

действие имеющееся у него арифметическое устройство *2*. После вычислений, он их записывает в определенную графу (ячейку) на бумаге, которая служит запоминающим устройством *4*, способным длительно хранить полученные результаты. То, что не нужно хранить длительно человек держит в памяти для следующей операции. Выполнив первый пункт программы, вычислитель берет требуемые программой результаты из запоминающего устройства *4* и выполняет второй пункт программы и т. д. Таким образом, пункт за пунктом выпол-

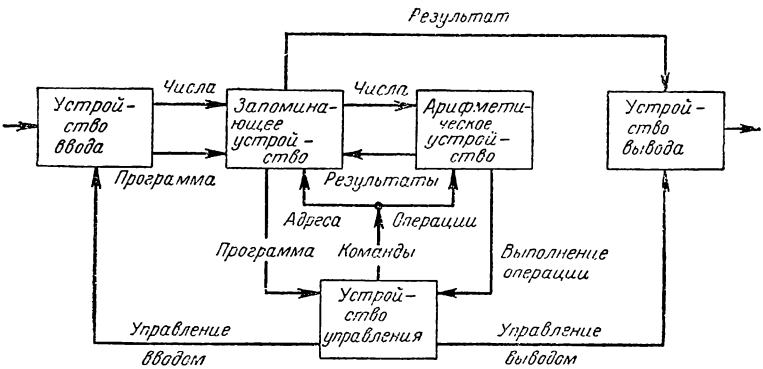


Рис. 16-9. Структурная схема цифрового вычислительного устройства (ЦВУ).

няется вся программа вычисления. На основании сказанного, очевидно, и для ЦВУ нужно иметь структурную схему, подобную показанной на рис. 16-8.

Структурная схема современного ЦВУ показана на рис. 16-9. На этой схеме устройство управления, очевидно, должно выполнять функции человека-вычислителя. Запоминающее устройство обычно состоит из двух отдельных блоков: внешнего запоминающего устройства, имитирующего записи вычислителя на бумаге, справочники, таблицы и др., и оперативного запоминающего устройства, хранящего только те сведения, которые быстро и непрерывно используются при вычислениях, и длительно храниться не должны. Арифметическое устройство заменяет все средства вычисления, которыми пользовался вычислитель: бумага, счеты, арифмометр, клавишная механическая ма-

шина и др. По-видимому, ЦВУ будет только тогда быстродействующим (тысячи и десятки тысяч операций в секунду), когда с такой же скоростью будут работать все блоки устройства. К сожалению, этому условию еще не удовлетворяют блоки ввода программы и вывода результатов. Описание устройства отдельных блоков будет дано ниже.

16-7. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОТДЕЛЬНЫХ БЛОКОВ ЦВУ

Работа ЦВУ (рис. 16-9) начинается с того, что через устройство ввода, в оперативное запоминающее устройство, вводится программа, состоящая из команд (распоряжений), которыми точно и в строгой последовательности перечисляются все действия машины (взять число, откуда взять, что с ним сделать, куда поместить после вычислений, прекратить работу и т. д.). Каждая команда состоит из двух частей: оперативной — что сделать, и чисел, над которыми должна производиться математическая операция. В первой части команды, условным числом, называемым кодом или шифром операции, указывается, например: 01 — сложить, 02 — вычесть, 03 — умножить, 04 — разделить и т. д. Во второй части команды указываются не сами числа, а те места, откуда их взять. Дело в том, что каждое число помещается в отдельной ячейке запоминающего устройства, снабженной номером, называемым адресом ячейки. Таким образом, команда 01 0025 0030 0175 приказывает сложить число, взятое из ячейки 0025, с числом ячейки 0030 и результат поместить в ячейку 0175. После ввода программы в оперативное запоминающее устройство вся работа ЦВУ происходит автоматически.

Управление ЦВУ производится при помощи электрических импульсов напряжения или тока, которые усиливаются, формируются для придания им прямоугольной формы и в определенных условных комбинациях могут представлять числа. Эти импульсы формируются в устройстве управления и при помощи их производится выборка чисел и команд из запоминающего устройства. В соответствии с адресом числа передаются из запоминающего устройства в арифметическое, где над ними производится вычислительная операция, указанная кодом команды. Результат вычислений передается обратно в запоминающее устройст-

во, по адресу, указанному командой (рис. 16-9). После окончания одной операции устройство управления получает из арифметического устройства ответ о выполнении операции и переходит к следующему пункту программы.

16-8. ДВОИЧНАЯ СИСТЕМА СЧИСЛЕНИЯ

При вычислениях мы обычно пользуемся д е с я т и ч н о й позиционной системой. В этой системе знаки 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, называемые цифрами, представляют нуль и первые девять целых чисел. Десять обозначается двумя цифрами, 10, и является основанием системы. Каждая цифра представленного ряда имеет различную значимость в зависимости от ее позиции или места в числе. Например, в числе 345,2: справа от запятой, две десятых — 2.10^{-1}; слева от

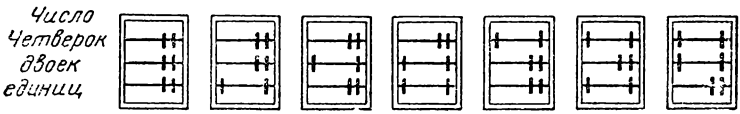


Рис. 16-10. Двоичное счисление при работе на конторских счетах.

запятой — пять единиц — 5.10^0; четыре десятка — 4.10^1 и три сотни — 3.10^2. Следовательно, все число представляется так:

$$345{,}2 = 3.10^2 + 4.10^1 + 5.10^0 + 2.10^{-1} \text{ единиц.}$$

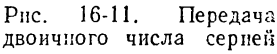
Если представить себе счетчик любой системы, то он в каждом разряде должен быть способным принимать девять различных устойчивых положений. Для ЦВУ оказалась удобной система с основанием 2, называемая д в о и ч н о й, при которой имеются только две цифры 0 и 1. Когда в первом (правом) разряде вместо единицы должно появиться два (2), то двойка переносится в виде единицы (1) в старший разряд, а в младшем ставится 0.

Такой счет получается, если пользоваться счетами, имеющими на каждой спице только по две костяшки (рис. 16-10).

Ниже приведены несколько чисел, написанных в двоичной системе:

1 — один	1011 — одиннадцать
10 — два	1100 — двенадцать
11 — три	1101 — тринадцать
100 — четыре	1110 — четырнадцать
101 — пять	1111 — пятнадцать
110 — шесть	10000 — шестнадцать
111 — семь	0,1 — половина
1000 — восемь	0,01 — четверть
1001 — девять	0,001 — восьмая
1010 — десять	0,11 — три четверти

Таким образом, число двоичной системы 1011,1 представляет: справа от запятой, одна половина — 1.2^{-1} и слева от запятой одна единица — 1.2^0, одна двойка — 1.2^1, нуль четверок — 0.2^2 и одна восьмерка — 1.2^3, т. е. $(1011,1)_2 = 1.2^3+0,2^2+1,2^1+1,2^0+1.2^{-1} = (8+0+2+1+0,5=11,5)_{10}$. Индексы 2 и 10 обозначают основание системы.



1	0	1	1	1

Рис. 16-11. Передача двоичного числа серией импульсов.

Как можно видеть, в этом случае наличие цифры в каждом разряде (1) или отсутствие ее (0) может характеризоваться счетчиками релейного типа, управляемыми импульсами: включено — выключено, есть сигнал напряжения — нет сигнала, намагничен участок магнитной ленты — не намагничен и т. д.

Например, двоичное число 10111 может быть передано сигналами (импульсами) напряжения, показанными на рис. 16-11. Этот принцип и применяется в ЦВУ. Недостаток двоичной системы; в большом количестве разрядов счетчика по сравнению с системой десятичной, но он искупается большей простотой всего ЦВУ в целом. Перевод чисел из десятичной системы в двоичную и обратно производит само ЦВУ.

16-9. АРИФМЕТИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ В ДВОИЧНОЙ СИСТЕМЕ

Большое достоинство двоичной системы в простоте арифметических действий с числами, которые производятся так же, как и в десятичной системе. Сложим два числа, изображенные слева в десятичной системе, а справа — в двоичной *(пример 1)*.

Пример 1		*Пример 2*		*Пример 3*	
	11		• •		
+ 25	+ 11001	− 25	− 11001	+ 25	+ 11001
+ 19	+ 10011	− 19	− 10011	+ 81	+ 01100
44	101100	06	00110	(1)06	100101
					⋮ ↑ 1
					110

В десятичной системе при сложении 5 + 9 единица (т. е. один десяток) переносится в старший разряд (десятков) и прибавляется к числам десятков 2 + 1. Точно так же и в двоичной системе: две единицы первого (правого) разряда дают двойку, которая, как единица, переходит в разряд двоек, а в сумме первого разряда получается нуль. Две единицы (двоек) второго разряда дают в сумме четверку, которая, как единица, переносится в разряд четверок. Сумма в разряде двоек равна нулю, а в разряде четверок — единице и т. д.

При вычитании *(пример 2)* в десятичной системе из разряда десятков пришлось занимать единицу и разность равна шести. При двоичной системе, в случае необходимости, из старшего разряда приходится занимать двойку, четверку и т. д. В первом разряде *примера 2* разность равна нулю. Во втором разряде из занятой двойки вычитается единица и в разности остается единица. В третьем разряде остается единица, а в четвертом и пятом нули.

В ЦВУ вычитание обычно заменяется сложением с числом, записанным о б р а т н ы м к о д о м, т. е. когда единицы числа заменены нулями, а нули — единицами. Это сложение произведено в *примере 3*. При десятичной системе это делается так: уменьшаемое 25 складывается с числом, дополняющим вычитаемое до числа, выраженного единицей с нулями (100—19 = 81), и в сумме отбрасывают единицу высшего разряда. Ответ получается шесть, как и при вычитании.

В двоичной системе к числу 11001 прибавляется число 10011, записанное обратным кодом, т. е. число 01100. Далее, единица старшего разряда суммы переносится в младший разряд и прибавляется к нему. Ответ получается тот же, что и при вычитании. Все это выполняет самостоятельно арифметическое устройство ЦВУ.

Таблица умножения в двоичной системе необычайно проста:

$$0.0 = 0;\ 1.0 = 0.1 = 0;\ 1.1 = 1.$$

Умножим 4 на 5, или в двоичной системе 100 на 101 (*пример 4*):

Пример 4.

$$\begin{array}{r} \times\begin{array}{r}100\\101\end{array}\\ \hline +\begin{array}{r}100\\100\end{array}\\ \hline 10100 \end{array}$$

Таким образом, при умножении на единицу множимое число переписывается, а при умножении на нуль производится сдвиг влево на один разряд. Все умножение сводится к сдвигу умножаемого числа на один разряд и сложению, что и выполняет арифметическое устройство.

Деление сводится к многократному вычитанию делителя из делимого и дополнению получаемого остатка справа (*пример 5*):

Пример 5.

$$\begin{array}{r|l} -\begin{array}{r}111000\\1000\end{array} & \begin{array}{l}1000\\ \hline 111\end{array}\\ \hline -\begin{array}{r}1100\\1000\end{array} & \\ \hline -\begin{array}{r}1000\\1000\end{array} & \\ \hline 0000 & \end{array}$$

т. е. 56 : 8 = 7.

Так как умножение заменяется многократным сложением, деление — многократным вычитанием, а вычитание может быть заменено сложением, то все арифметические действия сводятся к сложению.

16-10. ПРИНЦИП РАБОТЫ НЕКОТОРЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЦВУ

Все ЦВУ состоит из устройств: запоминающего, управления, арифметического и др., а каждое из них из отдельных типовых элементов, называемых ячейками. Каждая ячейка выполняет определенные действия и, будучи включена определенным образом в общую схему, пропускает или задерживает посланный импульс, усиливает его или сдвигает на разряд и т. д.

Данное состояние ячейки определяется высоким или низким уровнем напряжения, подаваемого на нее, наличием или отсутствием импульса напряжения или использованием импульсов двух полярностей. В ЦВУ используются приборы с односторонней проводимостью, вакуумные и полупроводниковые диоды и триоды (см. гл. 13).

Эти приборы в дальнейшем изображаются так, как показано на рис. 16-12. Прибор пропускает ток, когда потенциал анода выше потенциала катода (сопротивление прибора мало) и запирается при обратной полярности напряжения (сопротивление прибора очень большое).

Рис. 16-12. Условное изображение вентиля.

а) Клапан или вентиль

К л а п а н (вентиль) показан на рис. 16-13. Само название показывает, что он предназначен для задержки или пропуска импульса напряжения. Действительно, если на верхнюю точку входа подан прямоугольный импульс положительной полярности, то через вентиль пойдет ток от анода к катоду и через электрические цепи управляющего входа, не показанные на рисунке, к заземлению. Сопротивление r велико, а сопротивление вентиля ничтожно и можно считать, что все напряжение падает на сопротивлении r. Следовательно, потенциал анода, а значит, и выход схемы почти не отличается от потенциала земли. Поэтому считают, что на выход импульс не передался (на выходе нуль). Если одновременно с импульсом на входе подать на управляющий вход положительный импульс такой же величины или большей, чем на входе, то вентиль запрется. Ток в сопротивлении r будет равен нулю, а потенциал выхода равен потенциалу входа, т. е. положительный импульс передан на выход (единица). Этот механизм работы осуществляется во всех схемах с вентилями, приведенных ниже.

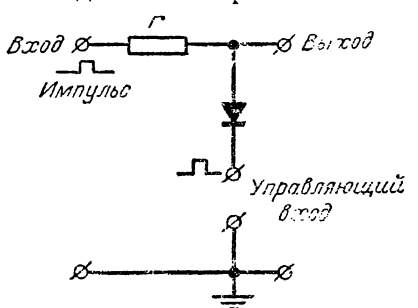


Рис. 16-13. Схема работы клапана.

б) Схема совпадения

С х е м а с о в п а д е н и я (условное обозначение *И*) показана на рис. 16-14. При появлении положительного импульса на анодах вентилей через них проходит ток. На

сопротивлении r падает почти все напряжение и импульс на выход не передается (нуль). Если подать положительный импульс на один из входов A, $Б$ и B, дело не меняется, так как ток будет проходить через два других вентиля. Положительный импульс (единица) передается на выход только в том случае, когда одновременно все три вентиля заперты положительными импульсами на управляющих входах A, $Б$, B, почему и схема называется схемой совпадения.

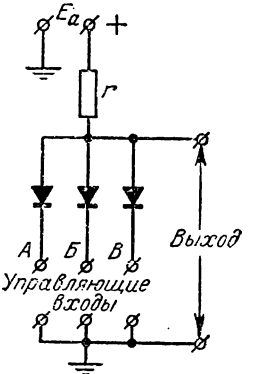


Рис. 16-14. Логическая схема совпадения.

в) Собирательная схема

Собирательная схема (условное обозначение *ИЛИ*) показана на рис. 16-15. При подаче положительного импульса, хотя бы на один из входов A, $Б$, B, через сопротивление r будет протекать ток. Так как внутреннее сопротивление вентилей ничтожно, то все падение напряжения сосредоточено на сопротивлении r, а верхняя точка его и, значит, верхняя точка выхода будут точкой высокого потенциала (единица). Схема потому и называется собирательной, что собирает импульсы (единицы), поступающие с разных направлений. Одновременно она при подаче положительного импульса на один из входов, например A, запирает высоким потенциалом два других входа $Б$ и B.

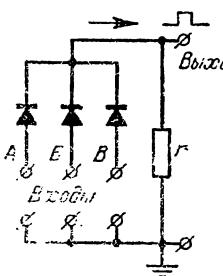


Рис. 16-15. Логическая схема собирательная.

г) Схема инвертора

Схема инвертора (условное обозначение *НЕ*) показана на рис. 16-16. При отсутствии сигнала (нуль) на входе триод заперт отрицательным напряжением смещения E_c. Потенциал верхней точки выхода равен потенциалу положительного зажима источника анодного напряжения E_a, т. е. на выходе единица. При появлении положительного импульса на входе (сетке) триод проводит ток и напряжение нижней точки сопротивле-

ния r, т. е. на выходе резко падает (нуль). Таким образом, входной сигнал — единица преобразуется в сигнал — нуль.

Из этих основных схем формируются все более сложные схемы ЦВУ. В дальнейших схемах заземляющая их часть для простоты не показывается.

д) Цепочка клапанов

Цепочка клапанов с одним управляющим входом показана на рис. 16-17. Импульсы с входов на выходы могут быть переданы только в том случае, когда на управляющий вход подан импульс, запирающий вентили. Если этого импульса нет, то при положительных импульсах на входах через вентили проходит ток и благодаря большому падению напряжения на сопротивлениях r потенциал анодов и выходов близок к нулю.

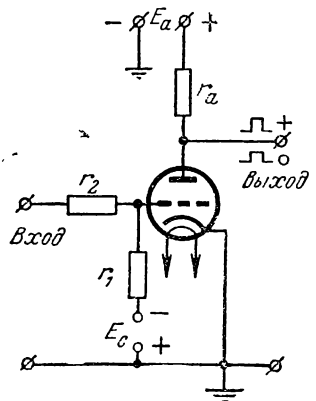


Рис. 16-16. Логическая схема инвертора.

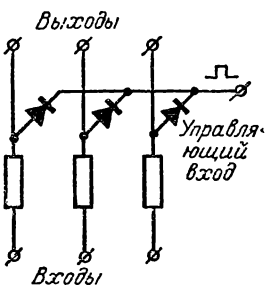


Рис. 16-17. Цепочка клапанов с одним управляющим входом.

е) Схема сдвигателя

Схема сдвигателя на один разряд дана на рис. 16-18. Как было показано выше, при умножении на единицу в двоичной системе записывалось само множимое число, а при умножении на нуль это же число записывалось со сдвигом на один разряд. Операцию сдвига и выполняет сдвигатель.

Если высокий потенциал существует только на входах цифр, а на шинах *I* и *II* такого потенциала нет, то токи про

ходят через диоды *1*, *2*, *3*, *4* и потенциалы на выходах очень малы (сигналов нет). При подаче положительного импульса на шину *I* запираются диоды *1* и *2*; импульсы проходят через диоды *6* и *8* на средний и правый выходы. Диод *7* заперт

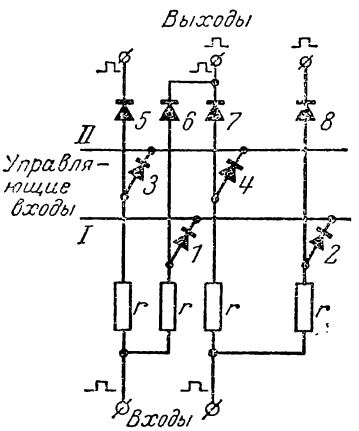


Рис. 16-18. Схема сдвигателя на один разряд.

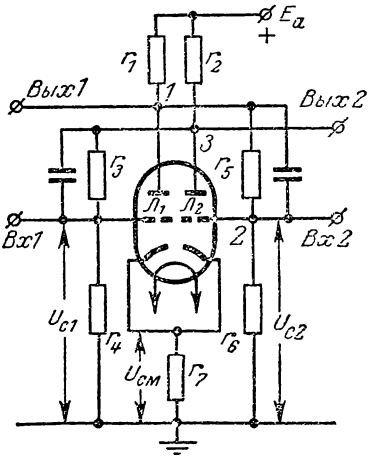


Рис. 16-19. Схема триггера.

высоким потенциалом левого входа. Если подать импульс на шину *II*, то запираются диоды *3* и *4*. Через диоды *5* и *7* импульсы передаются на левый и средний выходы (сдвигаются влево), а диод *6* блокирован высоким потенциалом.

ж) Электронный триггер

Электронный триггер или электронное реле является наиболее важным элементом ЦВУ. Он собирается из двух триодов или одного двойного триода, как показано на рис. 16-19 (см. также гл. 13). Особенность этого реле в том, что устойчивое состояние его будет только тогда, когда через одну половину лампы, например правую, ток проходит, а через другую — левую, нет, и наоборот.

Предположим невозможное, что через лампы $Л_1$ и $Л_2$ проходят равные токи. Пусть под влиянием ничтожнейшего, случайного изменения сопротивления в цепи лампы $Л_1$ ток ее возрос. Тогда потенциал точки *1* уменьшится, ток делителя $r_5 r_6$ уменьшится, потенциал точки *2*, а значит,

напряжение на сетке лампы $Л_2$ упадет и ток в ее анодной цепи уменьшится. При этом увеличится потенциал точки *3*, а следовательно, и напряжение на сетке лампы $Л_1$. В результате этого ток в анодной цепи лампы $Л_1$ лавинообразно нарастает, а лампы $Л_2$ — падает. Таким образом, триггер за микросекунды приходит в такое состояние, когда лампа $Л_1$ проводит ток (триод открыт), а лампа $Л_2$ — заперта. Если подать положительный импульс на вход *2* или отрицательный на вход *1*, то мгновенно лампа $Л_1$ запирается, а лампа $Л_2$ — открывается.

Схема триггера применяется в запоминающих устройствах и служит для запоминания только одного разряда числа. Она может быть выполнена и на полупроводниковых триодах. Емкости, включенные параллельно сопротивлениям $r_3 r_5$, служат для ускорения переброса триггера, так как, представляя в этот момент очень малые сопротивления, они шунтируют большие сопротивления r_3 и r_5.

16-11. ПРИНЦИП РАБОТЫ ДВОИЧНОГО СЧЕТЧИКА

Как было сказано выше, триггер служит для запоминания одного разряда числа двоичной системы и фиксирует наличие цифры в разряде (единица) или отсутствие ее (нуль). Таким образом, количество триггеров равно количеству разрядов числа. Цепочка триггеров для запоминания одного числа называется р е г и с т р о м.

На рис. 16-20 показана схема работы двоичного счетчика на три разряда — три последовательно соединенные триггера. Пусть триггеры *№ 1*, *№ 2*, *№ 3*, показанные в верхнем ряду, находятся в таком состоянии, когда проводит ток их левая часть (заштриховано) и не проводит — правая. Это состояние принято за нуль и число, записанное триггерами, 000. На вход триггера *№ 1* приходит серия равномерно следующих импульсов.

Первый из них произведет переброс триггера в обратное состояние (1), что показано стрелкой → слева направо, на второй строке на рис. 16-20. На счетчике записано число 001. Второй импульс производит обратный переброс триггера *№ 1*, справа налево, при котором проводит левая половина (0), но при этом перебросе триггер выдает свой импульс триггеру *2*, в котором произойдет переброс слева направо. Таким образом, записано число 010. При третьем импульсе на входе триггера *№ 1* происходит запись еще единицы —

011; при четвертом прибавляется еще единица, а так как переброс был справа налево, то происходит передача импульса на триггер № 2. Переброс последнего был справа налево, следовательно, триггеру № 3 передается импульс уже с триггера № 2. Число, записанное на счетчике, равно 100, и т. д. Восьмой импульс произведет сброс всего числа. Таким образом, трехразрядный счетчик записывает числа от 0 до 7 десятичной системы.

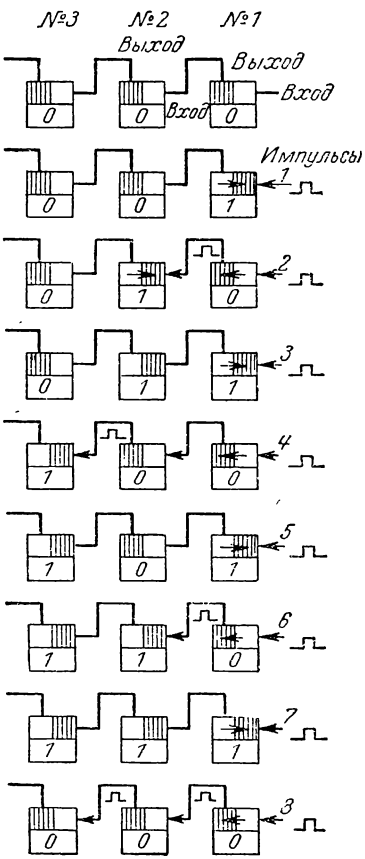


Рис. 16-20. Работа двоичного счетчика.

16-12. ПРИНЦИП РАБОТЫ СУММАТОРА АРИФМЕТИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

Предположим, что следует сложить два двоичных числа $A = 1110$ и $Б = 1101$. Сложение производится последовательно, разряд за разрядом, как при обычном счете.

$$\begin{array}{l} П = 11 \\ A = 01110 \\ Б = 01101 \\ \hline C = 11011 \end{array}$$

При сложении чисел первого разряда $0 + 1$ в сумме получается 1; так же и при сложении чисел второго разряда $1 + 0$ получается 1. При сложении чисел третьего разряда $1 + 1$ получается 2. Следовательно, двойка, как единица, переносится в четвертый разряд или, как мы говорим, «единица в уме». Эта единица поставлена в строке переноса $П$, над числом A. Складывая четвертый разряд, получаем 3; половина двойки, т. е. 1, идет в сумму C, а единица переноса переходит в сумму пятого разряда, где $C = П + A + Б = 1 + 0 + 0 = 1$.

Очевидно, устройство для суммирования — с у м м а т о р при последовательном суммировании, как это делалось, должен иметь два входа для чисел *А* и *Б*, вход для переноса *П*, выход для суммы *С* и выход для числа *П*, переносимого в следующий разряд. Блок-схема такого устройства, состоящего из запоминающего блока, однозарядного сумматора и устройства задержки (для переноса) на один разряд, показана на рис. 16-21.

Схема работы сумматора (рис. 16-22) осуществляется при помощи логических схем *И*, *ИЛИ*, *НЕ*, рассмотренных в § 16-10. Для простоты все устройства заземления, форми-

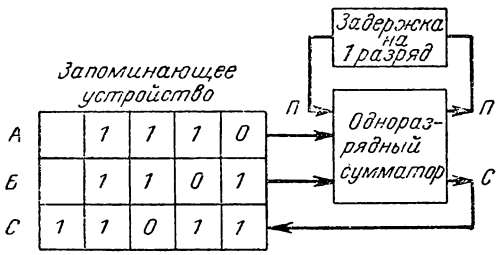


Рис. 16-21. Блок-схема работы сумматора.

рования импульсов, усиления их на рис. 16-22 не показаны. При разборе схемы необходимо вспомнить следующее.

Так как все схемы *И*, кроме *N1*, присоединены к положительному зажиму источника энергии E_a, то через сопротивления *r* этих схем и внутреннее сопротивление источников сигналов проходит ток. Отрицательный зажим источников заземлен. Потенциал анодов этих схем невысок, так как значительная часть напряжения падает на сопротивлениях *r*. Импульсы высокого потенциала на анодах появляются только в те моменты, когда на все катоды приходят положительные импульсы напряжения, способные запереть вентили. Только тогда положительные импульсы схем *И* передаются дальше.

Через схемы *ИЛИ* положительный импульс проходит, если он подается хотя бы к одному аноду вентиля.

Схема *НЕ* заперта отрицательным потенциалом на сетке лампы. При этом потенциал ее анода высок, так как в ее анодном сопротивлении *r* ток не протекает. Этим потенциалом нормально заперт вентиль *И1*, и только в этом

состоянии через его сопротивление r может пройти положительный импульс на выход C.

При появлении положительного импульса напряжения на сетке лампы она пропускает ток, потенциал на ее аноде падает и схема *И1* открывается. В этом случае потенциал анода вентиля *И1* при поступлении импульса от схемы *ИЛИ1* будет низким, так как ток проходит через лампу схемы *НЕ*. Потенциал выхода C тоже будет низким.

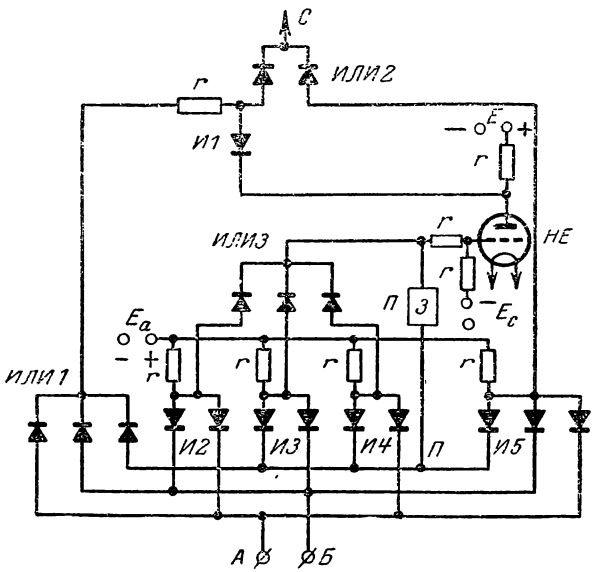


Рис. 16-22. Схема работы сумматора.

Теперь можно рассмотреть процесс сложения двух предложенных выше чисел. Триггеры регистра суммы C запоминающего устройства (рис. 16-21) перед началом операции сложения ставятся на нуль. Устройство управления посылает периодически импульсы, которыми и управляется схема. За каждый период складываются цифры одного разряда.

В течение первого импульса из запоминающего устройства (рис. 16-21) выбираются цифры младшего разряда $A = 0$ и $Б = 1$. Другими словами, на вход $Б$ сумматора (рис. 16-22) поступает импульс положительного потенциала, а на входе A его нет. Тогда импульс проходит схему *ИЛИ1*,

сопротивление *r* схемы *И1*, *ИЛИ2*, на выход *С* и в младшем разряде регистра запоминающего устройства суммы *С* триггер перебрасывается в положения *1*.

Вторым импульсом из запоминающего устройства выбираются цифры $A = 1$ и $Б = 0$. Импульс через вход (рис. 16-22) проходит схему *ИЛИ1*, *И1*, *ИЛИ2* и попадает на выход *С*. Триггер второго разряда запоминающего устройства перебрасывается в положение *1* (рис. 16-21).

Третий импульс выбирает из запоминающего устройства цифры $A = 1$ и $Б = 1$ и на входе сумматора *А*, *Б* получаются положительные импульсы. Тогда запирается схема *И2* и выдает положительный импульс на схему *ИЛИ3*. Импульс проходит на схему задержки *П* и на сетку лампы схемы *НЕ*. Лампа отпирается и начинает проводить ток. Диод схемы *И1* отпирается, импульсы *А* и *Б* через схему *ИЛИ1* и схему *И1* проходят через лампу схемы *НЕ*. Потенциал анода схемы *И1* низкий и на выход *С* через схему *ИЛИ2* сигнал не поступает. Триггер третьего разряда *С* запоминающего устройства остается в положении 0.

Импульс напряжения на линии задержки задерживается до момента суммирования цифр четвертого разряда. Это равносильно тому, как человек держит единицу «в уме». Об устройстве линии задержки (*З*) будет сказано ниже.

В четвертый такт сложения, два импульса *А*, *Б* и импульс *П*, выходящий из линии задержки, запирают схемы *И2*, *И3*, *И4*, которые через схему *ИЛИ3* выдают второй импульс на схему задержки и схему *НЕ*. В этом случае, как уже указывалось, схемы *ИЛИ1* и *И1* не выдают импульса на выход *С*. Однако поскольку схема *И5* заперта высоким потенциалом входа *А*, *Б* и первым импульсом схемы задержки *П*, то потенциал ее анодов становится высоким и через схему *ИЛИ2* на выход, в запоминающее устройство поступает импульс высокого напряжения. Происходит переброс триггера четвертого разряда в положение *1*.

При пятом такте импульсы *А*, *Б* отсутствуют, но возникший импульс переноса при суммировании предыдущего разряда через линию задержки схемы *ИЛИ1*, *И1*, *ИЛИ2* выдается на выход *С* в пятый разряд сумматора. Триггер этого разряда записывает 1. Таким образом, просуммированы числа $1110 + 1101 = 11011$ или в десятичной системе $14 + 13 = 27$.

На рис. 16-23 показан один из способов устройства *линии задержки*. Он основан на акустическом принципе. В стальную трубку *1*, заполненную ртутью *2*, вставлены две пластины из кварца *3*, при помощи резиновых колец *4*. Кварц имеет способность изменять свой объем при помещении его в изменяющееся электрическое поле. Если на вход одной пластинки подать импульс напряжения, то он вызовет механические колебания самого кварца и ртути в трубке, которые, с определенной скоростью, будут переданы другой кварцевой пластинке на выходе. Эти механические колебания кварц способен переобразовывать в электрические колебания на выходе. Скорость прохождения механических колебаний в ртути неизмеримо меньше скорости распространения электрических импульсов и поэтому электрический импульс передается с задержкой. Время задержки обычно составляет микросекунды. Меняя длину трубки, можно изменять время задержки.

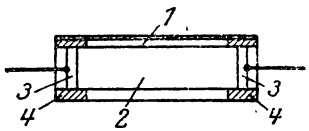


Рис. 16-23. Устройство акустической линии задержки.

16-13. ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

При обычном счете человеку приходится пользоваться памятью. Некоторые сведения он должен помнить кратковременно, например при сложении помнить, что единицу надо сложить с цифрами следующего разряда, при вычитании, что единица занята в старшем разряде. Он должен всегда помнить таблицу умножения и быстро вызывать ее из памяти, но он не должен помнить цифры синусов, косинусов углов, логарифмов чисел и др. Эти сведения у него хранятся в других устройствах памяти — справочниках, таблицах и т. п.

С запоминающими устройствами (памятью) ЦВУ мы уже встречались — регистр из триггеров, ртутная линия задержки. Однако запоминающее устройство для хранения большого числа многоразрядных чисел из триггеров было бы громоздким.

Все запоминающие устройства ЦВУ разделяются на две основные группы: *оперативные* и *внешние накопители*. Оперативные запоминающие устройства непосредственно связаны с арифметическим устройством и

определяют скорость работы ЦВУ. Они обладают сравнительно малой емкостью (сотни, тысячи и десятки тысяч чисел), но способны очень быстро, за микросекунды, принимать числа и выдавать их. Внешние накопители с арифметическим устройством непосредственно не связаны, а связаны с оперативной памятью и являются ее резервом. Они способны хранить сотни тысяч, миллионы и даже миллиарды цифр, но принимают и выдают их группами. Время выборки чисел большое — десятки миллисекунд.

Оперативное запоминающее устройство может быть выполнено из ферритовых тороидальных элементов. На

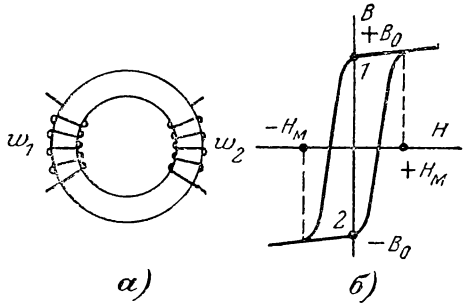


Рис. 16-24. Принцип работы ферритового элемента запоминающего устройства.

рис. 16-24, *а* показано кольцо из феррита диаметром 1,4 до 10 *мм*, с двумя обмотками, а на рис. 16-24, *б* — его кривая намагничивания. Принято считать положительную индукцию $+B_0$ за код единицы, а отрицательную $-B_0$ за код нуля.

Пусть в обмотках w_1 и w_2 тока нет и остаточная индукция характеризуется точкой *2*, т. е. $-B_0$. Тогда считают, что на сердечнике записана двоичная цифра 0. Если на обмотку w_1 подан положительный импульс такой величины, что напряженность поля на мгновение будет больше $+H_м$, то после импульса окажется, что остаточная индукция равна $+B_0$ и таким образом записана двоичная цифра *1*. При повторном импульсе того же знака остаточная индукция останется равной $+B_0$. При подаче импульса обратного знака сердечник опять перемагнитится и будет записан нуль. Таким образом, сердечник ведет себя как триггер и при помощи набора сердечников можно записывать или считывать цифры двоичной системы, за время меньшее 10 *мксек*.

При перемагничивании во вторичной обмотке w_2 возникают импульсы э. д. с. Если же повторный импульс первичной обмотки — одного знака, то э. д. с. практически не возникает.

Такие ферритовые кольца в количестве сотен тысяч собираются в запоминающую матрицу, которая условно показана на рис. 16-25. Обмотки в этом случае заменяются проводами, проходящими сквозь кольца, как показано на рис. 16-26. Горизонтальные и вертикальные провода служат для записи кодов цифр, а провода, идущие по диагонали, для их считывания. Каждый горизонтальный ряд служит для запоминания одного двоичного числа, а количество вертикальных рядов соответствует количеству разрядов в двоичном числе. Первоначальное состояние всех тороидов нуль.

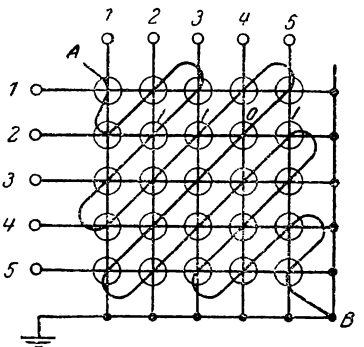


Рис. 16-25. Ферритовая матрица запоминающего устройства.

Пусть требуется записать во втором ряду (рис. 16-25) число 1101. Тогда во второй горизонтальный и 2, 3, 5-й вертикальные ряды подаются импульсы тока, создающие напряженность $+\frac{H_м}{2}$. В тороидах, находящихся на пересечении указанных проводов, создается напряженность $H_м$, они перемагничиваются и будут записаны единицы. В тороидах 1 и 4-го вертикальных рядов напряженность будет равна $\frac{H_м}{2}$ и они не перемагничиваются. Число 1101 записано. В диагональном, считывающем проводе при этом возникает импульс, но он вследствие особого устройства внешних цепей матрицы не учитывается.

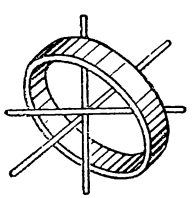


Рис. 16-26. Кольцо ферритовой матрицы.

Числа, записанные на других горизонтальных рядах матрицы, остаются неизменными, так как при записи числа 1101 токи, проходившие по проводам, не создавали в них напряженностей, больших $+\frac{H_м}{2}$.

При считывании числа в указанные выше провода подаются импульсы обратного напряжения. Во время этого единицы, записанные на тороидах, как бы стираются. Однако обычно желательно, чтобы прочитанное число в матрицах осталось. Для этого предусматривается устройство, восстанавливающее единицы в матрице после их считывания. Запоминающие матрицы имеют емкость на 100 000 и более двоичных знаков и хранят их неограниченно долго.

Большое распространение в ЦВУ получили запоминающие устройства с магнитной записью. Они используются как внешние накопители и как промежуточные запоминающие устройства, между накопителями и оперативным запоминающим устройством. Принцип их работы сводится к следующему. Движущаяся поверхность (лента или барабан), покрытая магнитным материалом, обладающим большой остаточной индукцией, пробегает мимо специальной головки, представляющей собою электромагнит. В обмотку электромагнита подаются импульсы тока в соответствии с кодом числа, а на магнитной поверхности остаются намагниченные участки, являющиеся записью числа. Запись и считывание обычно производятся при помощи одной и той же головки, показанной на рис. 16-27.

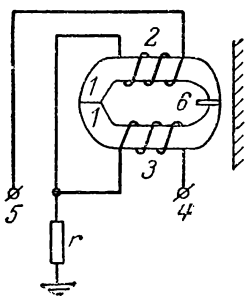


Рис. 16-27. Записывающая и считывающая головка для запоминающего устройства с магнитной записью.

На магнитопроводе из листового ферромагнитного материала *1*, с малой остаточной индукцией, навиты две обмотки *2* и *3*. Запись единицы производится при подаче импульса к зажиму *4*, а запись нуля к зажиму *5*. Считывание получается с зажима *4*. Воздушный зазор *6* между полюсами магнитопровода образуется прокладкой латунной фольги, толщиной приблизительно 0,02 *мм*. Число головок должно соответствовать количеству разрядов записываемого числа, как показано на рис. 16-28, для записи на барабане.

Барабан из алюминия покрыт тонким слоем магнитного материала, а головки расположены над его поверхностью вдоль образующей цилиндра, в местах, показанных стрелками. Число головок 5—8 на один сантиметр образующей

барабана. По образующей располагается и запись числа. Например, при записи двоичного числа 1011 в головки будут поданы импульсы, показанные на рис. 16-29, *а*. На поверхности барабана появятся намагниченные участки — д и п о л и (рис. 16-29, *б*). При считывании, когда намагниченный участок вращающегося барабана пробегает мимо воздушного зазора головки, в считывающей обмотке получаются импульсы э. д. с., показанные на рис. 16-29, *в*. Эти импульсы после усиления и преобразования в импульсы прямоугольной формы поступают в арифметическое устройство.

При записи, по окружности барабана, образуются как бы дорожки из цифр по числу головок. Плотность записей ди-

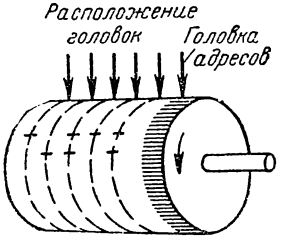


Рис. 16-28. Магнитная запись на барабане.

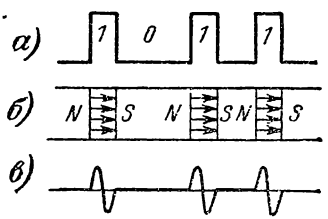


Рис. 16-29. Получение диполей при магнитной записи числа.

полей по окружности 1—3 на 1 *мм*. Емкость магнитных барабанов достигает 1,5—2 млн. двоичных знаков. Одна дорожка и одна головка (рис. 16-28) служат для счета адресов ячеек записанных чисел и соединяются со специальным счетчиком ячеек. Барабан непрерывно вращается и выбирать числа можно только по очереди. При скорости вращения барабана $n = 6\,000 — 12\,000$ *об/мин*, приводимого во вращение электродвигателем, время отыскания нужной ячейки составляет сотые доли секунды.

Точно так же производится запись на движущуюся ленту — эластичную основу, с нанесенным на нее слоем лака, смешанного с ферромагнитным порошком. Головки располагаются по ширине ленты, а дорожки записи — вдоль длины ленты. Скорость считывания ограничивается допустимой скоростью перемотки ленты. Магнитные ленты применяются, как дополнительные, медленно работающие запоминающие устройства, емкость которых практически не ограничена.

Программа работы машины вначале составляется в цифровом виде на бумаге специалистом по программированию. В этом виде ЦВУ не может принять ее к исполнению. Информация, изложенная цифрами в программе, должна быть преобразована в вид, доступный для обработки ЦВУ. Это выполняют специальные машины, не входящие в блок ЦВУ.

Для этого цифры программы заменяются отверстиями, пробитыми на специальных картонных картах или бумажных (или целлулоидных) лентах. Карты и ленты имеют стандартные размеры; ленты хранятся в рулонах.

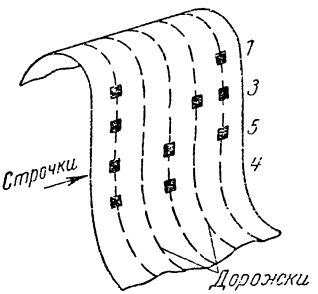


Рис. 16-30. Запись десятичного числа в двоично-десятичной системе.

Так как ЦВУ считает в двоичной системе, то казалось бы можно принять пробитое отверстие за единицу, а отсутствие его — за нуль. Однако программа пишется в десятичной системе, а число начальных данных, вводимых в ЦВУ, может достигать нескольких тысяч. Значит, необходим перевод чисел из десятичной системы в двоичную и пробивка отверстий для большого количества многоразрядных двоичных чисел, что совершенно нецелесообразно.

Поэтому вначале специальная машина — *перфоратор* переводит десятичную систему в *двоично-десятичную* и пробивает отверстия (перфорации) соответственно этой системе. Перевод заключается в следующем.

Любую цифру десятичной системы можно представить четырьмя цифрами (*тетрадами*) двоичной системы:

0 = 0000; 1 = 0001; 2 = 0010; 3 = 0011; 4 = 0100;
5 = 0101; 6 = 0110; 7 = 0111; 8 = 1000; 9 = 1001.

Тогда, пробивая отверстие для записи единицы и оставляя не пробитое место на карте или ленте записи для нуля, можно удобно записать любое число. На рис. 16-30 показана запись на ленте десятичного числа 1354, в двоично-десятичной системе. На четырех дорожках, считая справа налево, перфоратор пробивает четыре строчки, соответственно тетрадам чисел 1, 3, 5, 4. На левой пятой дорожке всегда про-

биваются отверстия, чтобы пустой дорожкой не изображался нуль. Таким образом, перфоратор проделал первую часть работы ввода — перевел число в двоично-десятичную систему и пробил отверстия.

Теперь перфолента, являющаяся своего рода запоминающим устройством, поступает в ЦВУ, где цифры отверстия преобразуются в электрические импульсы. Устройство ввода упрощенно показано на рис. 16-31. Механизм протяжки ленты имеет две бобины *1* и лента протягивается с одной на другую. Лента не прозрачна, но когда свет от лампы *2*, пройдя через линзу *3* и отверстие в ленте *4*, попадет на фотоэлемент *5*, то возникает слабый импульс тока. Этот импульс проходит через усилитель *6* и попадает в запоминающее устройство ЦВУ, где записывается единица. При отсутствии импульса записывается нуль. Каждой дорожке перфоленты, конечно, соответствует свой комплект освещающего и усиливающего устройства.

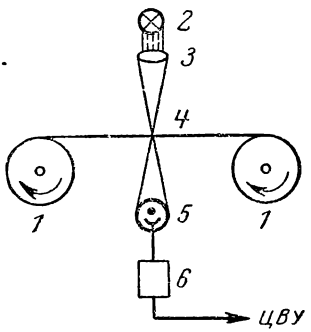


Рис. 16-31. Схема устройства ввода в ЦВУ.

Однако, если бы произвести запись соответственной тетрадам ленты (рис. 16-30), то получилось бы число 0001 0011 0101 0100, а это не число 1354 в двоичной системе. Поэтому ЦВУ, по специальной программе, производит вторую часть работы — переводит число из двоично-десятичной системы в двоичную и тогда уже записывает в запоминающее устройство.

Как для получения числа 1354, в десятичной системе надо суммировать $1.10^3 + 3.10^2 + 5.10^1 + 4.10^0$, так и ЦВУ, получая одну тетраду за другой, умножает их на множитель разряда, постепенно суммирует и получает уже число 1354 в двоичной системе:

$$
\begin{array}{r}
0001.1010^3 + 0011.1010^2 + 0101.1010^1 + 0100.1010^0 = \\
1\,1\,1\,1\,1\,0\,1\,0\,0\,0\,.\,.\,.\,.\,.\,1\,0\,0\,0 \\
1\,0\,0\,1\,0\,1\,1\,0\,0\,.\,.\,.\,.\,.\,\;\;3\,0\,0 \\
1\,1\,0\,0\,1\,0\,.\,.\,.\,.\,.\,\;\;5\,0 \\
1\,0\,0\,.\,.\,.\,.\,.\,\;\;4 \\
\hline
(1\,0\,1\,0\,1\,0\,0\,1\,0\,1\,0)_2\,.\,.\,.\,.\,(1\,3\,5\,4)_{10}
\end{array}
$$

Это число и записывается в запоминающее устройство.

Всю дальнейшую работу ЦВУ производит автоматически по импульсам устройства управления на основании программы.

Вывод результатов из ЦВУ производится аналогично вводу. Из запоминающего устройства, на выходной перфоратор подаются импульсы результатов, которые записываются на перфокартах или перфолентах в двоично-десятичном коде. Запись может производиться также на магнитную ленту. Устройство записи вывода — также относится к внешним запоминающим устройствам. Кроме записи на ленту, применяются электромеханические печатающие устройства и специальные фотопечатающие устройства, позволяющие выдавать до 200 чисел в секунду.

Основной недостаток всех систем ввода и вывода их малая скорость работы, не соответствующая скорости работы ЦВУ.

ГЛАВА СЕМНАДЦАТАЯ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

17-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электротехнологией называют область непосредственного использования электрической энергии для технологической обработки материалов. Появление в технике многих, совершенно новых материалов вызвало затруднение в их обработке существующими методами. Электротехнология во многих случаях превосходит по эффективности современные физические и химические методы обработки материалов.

В электротехнологии наравне с давно известными гальванотехникой, электрической плавкой и сваркой появились новые электрические методы обработки, при которых разрушение и удаление материала, или его перенос, изменения формы изделия и др. происходят под воздействием электрической энергии, которая непосредственно вводится в зону обработки. Эти методы можно разделить на электрохимические, электротермические и электромеханические. В первых используются главным образом химическое действие электрического тока, во вторых — тепловое действие электрического тока, а в третьих — механическое действие электрического поля и разряда.

Многие из этих новых методов обладают ценными для современной практики особенностями: механические свойства обрабатываемых материалов (например, твердость) не влияют на скорость и качество обработки, обрабатывающие инструменты могут быть более мягкими, чем обрабатываемый материал, этим методам доступны такие технологические операции, которые обычными, механическими способами невыполнимы. Все это ставит электротехнологию в ряд наиболее передовых способов обработки материалов.

В дальнейшем дается очень краткое описание отдельных операций электрохимической, электротермической и электромеханической обработки материалов.

17-2. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

а) Гальванотехника

Гальванотехникой называется способ осаждения металлов на металлические и неметаллические поверхности при помощи электролиза. Процесс электрохимического покрытия металлов металлическими пленками для механической их защиты или защиты от коррозии называется гальваностегией. Изготовление штампов, типографских клише, матриц для патефонных пластинок и др. способом электрохимического осаждения металлов называется гальванопластикой. Осаждение производится как на металлические основы, так и на неметаллические, причем в последнем случае они предварительно покрываются электропроводящим слоем (графит, металлическая фольга). Толщина гальванических покрытий не превышает обычно десятых долей миллиметра. Все эти способы известны и применяются очень давно.

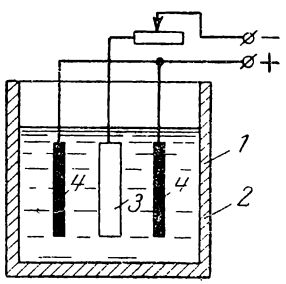


Рис. 17-1. Схема гальваностегической ванны.

На рис. 17-1 показана схема гальваностегической ванны. Ванна *1* наполнена специальным кислым или щелочным раствором *2*, температура которого поддерживается на определенном уровне.

Покрываемое изделие *3* является катодом, а анодами *4* служат пластины из того металла, которым покрывается изделие. Поверхность покрываемого изделия тщательно подготавливается (шлифуется, травится, обезжиривается). Для покрытия разными металлами применяются разные: рецептура растворов, температурный режим и плотность тока. Напряжение между электродами составляет 4—12 *в*, а токи ванн достигают 1 000—15 000 *а*.

б) Электрохимическое оксидирование металлов

Оксидированием называется процесс получения тонких пленок на поверхности металла, предназначенных для защиты металла от коррозии. Процесс ведется в соответствующих растворах, а оксидируемый предмет служит анодом. Электрохимическому оксидированию подвергается алюминиевая лента, алюминиевая проволока и другие изделия. При этом на поверхности алюминия образуется плотный слой окисла толщиной 0,01—0,1 *мк*, сверх которого получается окисная пористая пленка толщиной до 200 *мк*. Эта пленка обладает хорошими антикоррозийными и электроизолирующими свойствами, что очень важно при производстве конденсаторов, выпрямителей и др. Для работы ванн применяются источники тока напряжением 12—30 *в*.

в) Очистка металлов электрохимическим анодным травлением и обезжиривание

На рис. 17-2 показана ванна *1*, заполненная электролитическим раствором кислот или солей *2*, имеющим в работе температуру 15—35°. В раствор погружено очищаемое изделие *3*, поверхность которого покрыта окисной пленкой, ржавчиной, окалиной, жировыми составами (смазка, пасты, масла) и др. Изделие присоединяется к положительному полюсу источника энергии и является анодом. Оно может быть из любого металла или сплава и любой формы. Катодом служат пластины *4* из свинца, графита, кислотоупорной стали, поверхность которых подбирают соответственно форме изделия *3*. Расстояния между электродами (анод — катод) — 20 ÷ 250 *мм*.

От источника постоянного тока с напряжением $U = 4 \div 12$ *в* ток проходит через регулирующее сопротивление *5*. Рабочее напряжение между электродами устанавливается в пределах $U_р = 3 \div 8$ *в* и так, чтобы обеспечить

плотность тока на поверхности электродов, равную $\Delta = 0{,}05 \div 0{,}02$ *а/см*^{2}. Поверхность анода-изделия растворяется и вместе с металлом удаляются покрывающие его загрязнения. Производительность съема поверхности составляет 0,1—5 *мк/мин*, класс точности обработки 3—4, а класс чистоты обработки 3—6. Удельный расход энергии 10—40 *квт · ч/кг*. При очистке изделия только от жировых покрытий применяется щелочный раствор электролита.

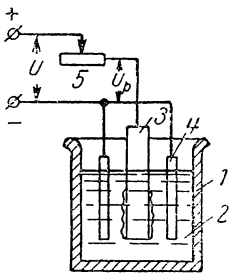


Рис. 17-2. Очистка металлов электрохимическим анодным травлением.

г) Электрохимическое глянцевание и полирование

Для химического полирования в ванну, подобную показанной на рис. 17-2, помещают изделие из чистого по построению металла — цветного или черного. Катод выполняется из свинца, легированной стали, графита или меди. При размещении катодов особенно заботятся о получении одинаковой плотности тока по всей поверхности анода-изделия. Для изделий из цветных металлов она составляет 0,1—0,5 *а/см*^{2}, а из черных — 0,4—0,6 *а/см*^{2}. В качестве электролита берутся растворы фосфорной, серной, хромовой кислот, при температуре 15—25° для цветных и 70—90° для черных металлов. Напряжение источника питания постоянного тока $U = 6 \div 12$ *в* для цветных металлов и $U = 15 \div 18$ *в* для черных металлов. Напряжения между электродами берутся соответственно $U_р = 5 \div 7$ *в* и $U_р = 12 \div 14$ *в*.

При растворении металла в указанных условиях все впадины шероховатой поверхности анода-изделия заполняются плохо проводящей ток пленкой, но не покрывающей выступающих неровностей. Последние растворяются, поверхность сглаживается и приобретает высокий блеск. Чистота поверхности получается на 2—3 класса выше исходной.

д) Электрохимическое прошивание полостей и отверстий в металлах

Электрохимическое прошивание отверстий достигается путем некоторого изменения технологии процессов, описанных выше. Прежде всего сильно увеличивается плот-

ность тока, составляющая здесь 100—140 *а/см²*. Кроме того, расстояние между электродами, которое в предыдущих процессах равнялось 20—250 *мм*, при прошивании уменьшается до 0,1—2 *мм*. Процесс прошивания ведется в струе быстро протекающего электролита, обычно хлористого натрия при $t = 20 \div 30°$ С. Указанные условия резко повышают растворение металла. Прошивка применяется для черных металлов и сплавов, а также — твердых сплавов.

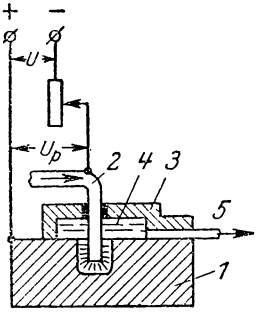


Рис. 17-3. Электрохимическое прошивание отверстий.

На рис. 17-3 показана схема прошивки отверстия в плите *1*, являющейся анодом. Инструмент для прошивки представляет собой трубку *2* из латуни, меди или стали, которая одновременно служит для подвода электролита. Форма прошиваемого отверстия в точности копирует форму сечения трубки и может быть любой. Глубина отверстия в изделии увеличивается постепенным опусканием трубки-катода. Над местом прошивки ставится специальная ванна *3*, в полости которой и происходит процесс. Отвод электролита производится через трубку *5*.

Применяемые напряжения $U = 15 \div 30$ *в* и $U_p = 10 \div 25$ *в*, расход энергии 8—15 *квт · ч/кг*. Класс чистоты обработки 5—8.

е) Анодно-механическое резание

Анодно-механическая обработка представляет собою группу промежуточных методов между электрохимическими и электроэррозийными. При малых удельных мощностях, подводимых в зону обработки, она приближается к электрохимическим методам, при больших — к электроэррозийным.

Анодно-механическое резание может производиться как при помощи диска для резки сечений не выше 300 × 300 *мм*, так и при помощи стальной ленты для любых сечений. Резке подвергаются черные металлы и сплавы — углеродистые, легированные, твердые и специальные сплавы.

На рис. 17-4 показано разрезание заготовки — анода *1* стальным вращающимся диском *2*, имеющим в зависимости

от условий обработки толщину 0,1—6 *мм* и окружную скорость 8—30 *м/сек*. К валу диска, скользящим контактом *4*, присоединяется отрицательный зажим источника постоянного тока с рабочим напряжением $U_р = 18 \div 30$ *в*. В зону резки при помощи шланга *3* подается электролит — жидкое стекло (водный раствор силикатов натрия). Плотность тока $\Delta = 7{,}5 \div 30$ *а/см*^{2}.

Сущность процесса заключается в следующем. В месте соприкосновения анода и катода, в присутствии электролита, металл анода растворяется, образуя неметаллическую пленку, которую вращающийся с некоторым нажимом на заготовку диск — катод все время срывает, чем обеспечивается дальнейшее растворение заготовки. Достоинство метода заключается в том, что устраняется дорогостоящий режущий инструмент, что особенно важно при резке твердых и сверхтвердых сплавов. Ширина реза обычно меньше, чем при обычных способах резки, благодаря чему сокращается количество отходов. Уменьшается расход энергии двигателя вращающего вал диска, так как диск слабо нажимает на изделие. Недостаток анодно-механического способа в том, что после многих видов обработки им, требуется отмыв изделия, загрязненного жидким стеклом.

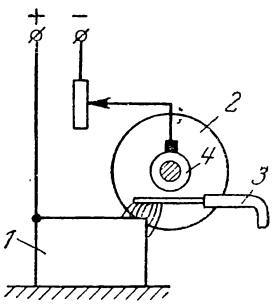


Рис. 17-4. Анодно-механическое резание.

Таким же образом производится обдирка изделий. Анодом в этом случае служит цилиндр (толстый диск) из чугуна или стали. Плотности тока берутся наибольшие, благодаря чему преобладают электротермические процессы. Разрушение обрабатываемой поверхности получается быстрое, поверхность обработки грубая, шероховатая.

ж) Анодно-механическое затачивание режущего инструмента

Анодно-механический способ применяется для заточки режущего инструмента из твердых, металлокерамических сплавов, для придания требуемой формы пластинам из твердых сплавов, находящим применение в режущем инст-

рументе и др. При этом методе отпадает необходимость в абразивных материалах, так как заточка производится стальным диском. Кроме того, при тех малых удельных давлениях, которые применяются здесь для заточки, инструмент меньше нагревается и портится. Изменение плотности тока позволяет установить режимы от обдирки при $\triangle = 15 \div 25$ *а/см*^{2}, до шлифовки при $\triangle = 4 \div 6$ *а/см*^{2} и доводки при $\triangle = 1 \div 2$ *а/см*^{2} и получать в последнем случае чистоту обработки высокого класса (7—8).

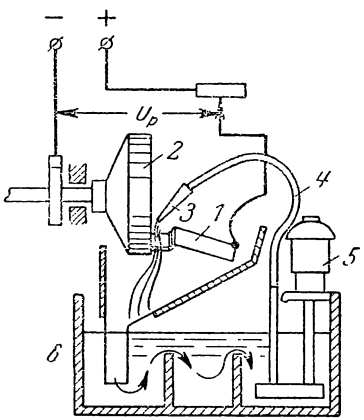


Рис. 17-5. Анодно-механическое затачивание режущего инструмента.

На рис. 17-5 показана схема устройства для заточки. Постоянный ток подается при рабочем напряжении на электродах $U_р = 10 \div 22$ *в*, анодом служит затачиваемый инструмент *1*, катодом — диск *2*, вращающийся с окружной скоростью 12—20 *м/сек*. Торцовая поверхность его показана на рис. 17-6. Электролит (жидкое стекло) подается в зону затачивания *3*, при помощи шланга *4* от насоса *5*. Сливающийся электролит попадает в бак *6*, где фильтруется и снова попадает в насос. Удельный расход энергии 3—15 *квт · ч/кг*.

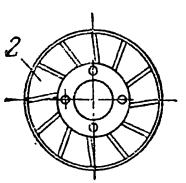


Рис. 17-6. Торцовая поверхность диска для анодно-механического затачивания.

з) Анодно-механическая чистовая обработка

Как уже было сказано выше, чистовая обработка получается в случае применения «мягких» режимов работы, т. е. при малых плотностях тока и удельных давлениях на обрабатываемое изделие. Иногда для очень чистой обработки исключают непосредственное соприкосновение анода и катода. Особо высокий класс чистоты поверхности (до зеркального блеска) достигается при электроабразивном шлифовании металлокерамических сплавов, полировка которых обычными способами практически невозможна.

На рис. 17-7 показана схема отделочного шлифования поверхности цилиндра. Постоянный ток при рабочем напряжении $U_р = 4 \div 5$ *в* подводится через щетку и контактное кольцо *5* к изделию *1*, вращающемуся с окружной скоростью 0,5—1,0 *м/сек* и к катоду *2* из стали или чугуна. Катод не соприкасается с анодом и между ними протекает электролит *3* в виде водных растворов солей (NH_4NO_3, KNO_3, NaF и др.). Плотность тока поддерживается равной 0,5 ÷ 1,2 *а/см*^{2}. Поверхности вращающегося цилиндра касается абразив *4* при удельном давлении 0,5—5 *кГ/см*^{2}.

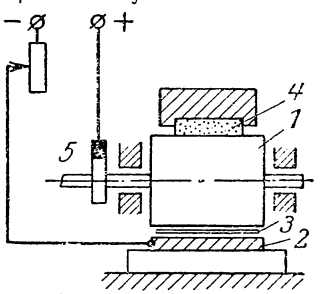


Рис. 17-7. Анодно-механическая чистовая обработка.

Такая шлифовка применяется к различным черным сплавам и твердым сплавам, причем достигается точность обработки 1 класса, а чистота обработки поверхности 10—12 класса.

17-3. ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

а) Электрическая сварка металлов

С в а р к о й называется способ соединения металлических деталей в неразъемное целое путем нагрева свариваемых мест. Эти места нагреваются до пластического или жидкого состояния. Современные способы сварки обеспечивают прочное соединение металлических деталей при толщине от 0,1 до 250 *мм*. Сваренные конструкции легче клепаных на 10—15% и легче литых на 30—40%. Сварка почти полностью вытеснила клепку.

б) Стыковая, точечная и шовная сварка

Для этих видов сварки строятся специальные трансформаторы на первичное напряжение 220 или 380 *в*, при вторичном напряжении 1—12 *в* и сварочных токах в десятки и сотни тысяч ампер. Для регулирования тока первичная обмотка секционирована, а вторичная состоит из одного-двух медных или алюминиевых витков большого сечения, охлаждаемых водой. Продолжительность включения (ПВ) рассчитывается в 20—30%.

На рис. 17-8 показана схема машины для стыковой сварки. Этот вид сварки применяется для соединения стержней, труб, арматуры железобетона, в инструментальном производстве и др.

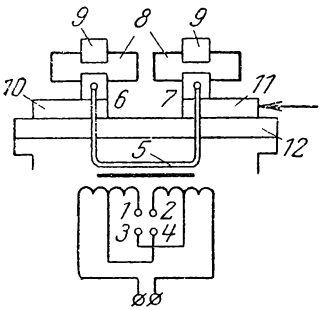


Рис. 17-8. Стыковая электросварка.

Секции первичной обмотки трансформатора переключаются ступенями переключателем *1*, *2*, *3*, *4*. Вторичная обмотка *5* присоединена к зажимам *6* и *7*. При соединении контактов переключателя *1* и *2* коэффициент трансформации наибольший, а напряжение вторичной обмотки *5* наименьшее. Когда соединены контакты *3* и *4*, напряжение обмотки *5* наибольшее. Свариваемое изделие *8* зажимается специальными зажимами *9*. Суппорт *10* неподвижен, суппорт *11* может перемещаться особым механизмом в направляющих плиты станка *12*.

Свариваемые детали *8* прижимаются друг к другу и трансформатор включают. Детали разогреваются и по достижении необходимой температуры ток выключают, а детали сдавливаются. Этот вид сварки сопротивлением применяется для углеродистых сталей и цветных металлов.

Если сначала включить трансформатор, а затем сближать детали *8*, то между их концами возникает искрообразование и оплавление поверхностей контактов. При последующем сжатии и одновременном отключении тока детали свариваются. Этот вид сварки оплавлением применяют для соединения труб, цепей, рельсов, инструмента, легированных сталей и разнородных металлов: алюминий — медь, сталь — медь, сталь — латунь.

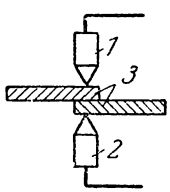


Рис. 17-9. Точечная электросварка.

На рис. 17-9 показана схема точечной сварки. Между контактами *1*, *2*, присоединенными ко вторичной обмотке сварочного трансформатора (рис. 17-9), расположены внахлестку свариваемые детали *3*. Точечная сварка служит для соединения листового, полосового и профильного металла в отдельных точках (цельнометаллические

вагоны, кузова автомашин и др.). Получается прочное, но не герметичное соединение. Для сварки существуют специальные машины. Верхний электрод *1* (рис. 17-9) может подниматься и опускаться. В месте контакта при включении тока происходит сильный нагрев; в центре сжатия металл размягчается до пластичного состояния и после выключения тока и сдавливания деталей образуется сварная, чечевицеобразная точка. Одноточечные машины дают до 2 000 точек, а многоточечные до 10 000 точек в час. Продолжительность включения машины 20—30%.

Для точечной сварки изделий из различных металлов: малоуглеродистой и нержавеющей стали, латуни и бронзы, сплавов алюминия, нихрома, пермаллоя, фехраля, манганина, константана и др. служат конденсаторные сварочные машины, применяемые в приборостроении, радиотехнике, вакуумном производстве, производстве тонких изделий и т. д. Принципиальная схема работы машины показана на рис. 17-10.

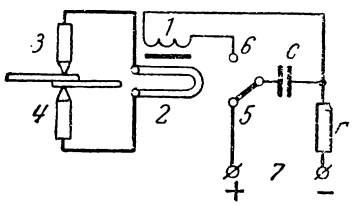


Рис. 17-10. Схема работы конденсаторной точечной сварочной машины.

Первичная обмотка *1* трансформатора работает при напряжении 220 *в*, частоте 50 *гц* и имеет около 200—600 витков. Вторичная обмотка *2* состоит из 1—2 витков и присоединена к рабочим контактам *3*, *4*. При положении ручки переключателя на контакте *5* конденсатор *C* заряжается от источника постоянного напряжения *7*. При переключении ручки на контакт *6*, запасенная конденсатором энергия импульсом передается первичной обмотке трансформатора и, в конечном счете, в зону сварки. Этой энергии достаточно для сварки в одной точке. Машина автоматически дозирует время зарядки конденсатора и мощность, необходимую для получения одной точки. Толщина свариваемых металлов от 0,02 до 0,5 *мм*, но возможно также приварить тонкий металл к металлу толщиной до 30 *мм*. Машина потребляет мощность около 100 *вт* и сваривает за смену до 3 000 точек. Режим сварки можно менять изменением емкости конденсаторов, числа секций первичной обмотки трансформатора и величиной усилия на электродах.

Шовная или роликовая сварка получается, если электроды *1* (рис. 17-11) представляют собой ролики, пневматически прижимаемые к материалу *2*, перемещающемуся между ними. Во время работы ролики непрерывно охлаждаются водой. Скорость сварки 0,5—0,6 *м/мин*, $ПВ = 50\%$. Машины применяются для роликовой сварки баков, труб и других герметических изделий из листов низкоуглеродистой стали толщиной до 2 *мм* и листов нержавеющей хромоникелевой стали, латуни и алюминиевых сплавов толщиной до 1,5 *мм*.

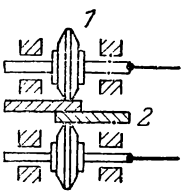


Рис. 17-11. Шовная (роликовая) сварка.

На контактных машинах сваривают детали толщиной от 0,1 до 90 *мм*.

в) Дуговая электросварка

Дуговая электросварка представляет собой наиболее распространенный способ сварки из всех существующих. Впервые она была предложена Н. Н. Бенардосом в 1882 г. (рис. 17-12). Она производится постоянным током, положительный зажим источника которого присоединяется к свариваемой детали *1*, а отрицательный — к угольному электроду *2*, зажатому в держателе *3*. Угольные электроды диаметром 8—30 *мм* и длиной 200—300 *мм* применяются для сварки сплавов цветных металлов, наплавки твердых сплавов, сварки при малой толщине и для получения бортовых соединений тонкостенных стальных изделий, когда не требуется присадочный материал. Дуга получается путем короткого замыкания между электродом *2* и изделием *1* и затем отрыва электрода от изделия. Под влиянием электрической дуги *4* кромки детали расплавляются и в шов при необходимости наплавляют присадочный материал *5*. Температура дугового пространства около 6 000°. При сварке постоянным током деталь всегда присоединяется к зажиму плюс для более устойчивого горения дуги и потому, что на положительном полюсе дуги выделяется большее количество тепла. Описание сварочного генератора было дано в § 8-21.

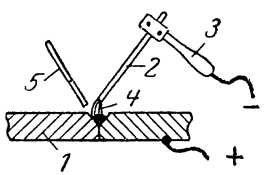


Рис. 17-12. Сварка электрической дугой угольным электродом.

Для защиты глаз и лица сварщика от действия лучей дуги и брызг металла применяются щитки и шлемы, снабженные специальными стеклами, поглощающими ультрафиолетовые и инфракрасные лучи.

Второй способ сварки металлическим электродом был предложен Н. Г. Славяновым в 1888 г. В этом случае (рис. 17-13) одновременно плавятся основной металл *1* и электрод *2*, являющийся присадочным материалом. Более 90% сварочных работ электрической дугой выполняются именно этим способом.

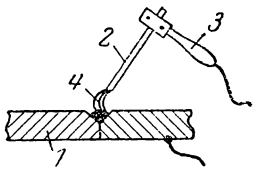


Рис. 17-13. Сварка электрической дугой металлическим электродом.

Металлические электроды изготовляются в виде прутков 1—12 *мм* диаметром и до 500 *мм* длиной. Для сварочных автоматов электрод приготовляется в виде мотков проволоки. При ручной сварке электроды покрываются специальной обмазкой. Обмазка применяется для ионизации дугового пространства, т. е. для поддержания устойчивости дуги. Кроме того, обмазка защищает металл от окисления и насыщения его азотом воздуха, а также дает различные присадки, увеличивая прочность шва.

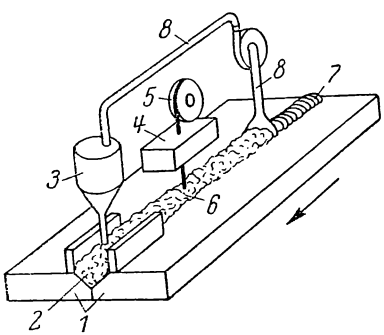


Рис. 17-14. Схема работы машины для сварки под слоем флюса.

Для сварки на переменном токе служат специальные трансформаторы, описание которых дано в § 9-14.

Качество дуговой электросварки и производительность процесса сильно возрастают при ее автоматизации. На рис. 17-14 показана схема автомата для сварки под слоем флюса. Все его устройство помещено на тракторе, передвигающемся относительно свариваемой детали. При движении трактора в указанном стрелкой направлении в подготовленный шов деталей *1* автоматически подается гранулированный флюс *2* из бункера *3*. Голый провод для сварки механизмом подачи *4* подается с катушки *5*. Дуга горит под слоем флюса в месте сварки *6*,

после которой остается заполненный металлом шов *7*. Избыток флюса отсасывается по трубам *8* обратно в бункер.

Процесс сварки под слоем флюса показан на рис. 17-15. На свариваемый шов насыпан флюс *1*, защищающий зону сварки от кислорода и азота воздуха и дающий легирующие присадки. Скорость движения электрода *2* составляет 6—32 *м/ч*. Расплавленный дугой *3* металл *4* постепенно затвердевает *5*, но все время шов покрыт слоем жидкого шлака *6*, который после сварки покрывает шов затвердевшей коркой *7*.

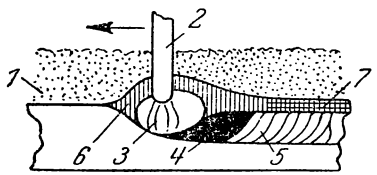


Рис. 17-15. Сварка под слоем флюса.

Для сварки деталей большой толщины широко применяется электрошлаковая сварка, разработанная Институтом имени Е. О. Патона. Схема сварки показана на рис. 17-16. Свариваемые детали *1* толщиной до 400 *мм* (детали прокатных станов, крупных кораблей, стальных сосудов высокого давления) устанавливают так, чтобы шов между ними получался толщиной 30—50 *мм*. В этот шов засыпается слой флюса на 50—70 *мм*. При пропускании тока от трансформатора *2*, между деталями и автоматически подаваемой электродной проволокой *3*, флюс расплавляется и образует ванну *4* с температурой около 2 000°. Поверхность свариваемого шва деталей *1* и электродная проволока оплавляются, образуя металлическую ванну *5* под слоем флюса, которая постепенно остывает, образуя шов *6*. Сварка производится автоматом, установленным на передвигающемся вдоль деталей тракторе.

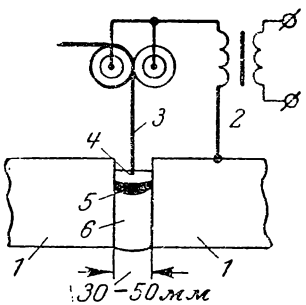


Рис. 17-16. Схема электрошлаковой сварки.

Технология новых тугоплавких, износоустойчивых материалов потребовала применения новых типов горелок, температура пламени которых намного выше температуры, даваемой простой электрической дугой. Такими являются плазменные горелки с температурой порядка 15 000°.

В электрической дуге основное пространство между электродами заполнено плазмой, содержащей примерно равное количество положительных и отрицательных зарядов. Температура столба плазмы в слаботочной угольной дуге достигает 6 000—7 000° К. Если повышать мощность дуги, то температура не возрастает, так как сечение дуги увеличивается, а плотность тока остается почти постоянной. Однако, если плазму сжимать, заставив ее проходить, например, через узкое отверстие, то температура ее повышается, что и использовано в плазменных горелках.

На рис. 17-17 показана принципиальная схема плазменной горелки. Вольфрамовый электрод *1* и в виде сопла медный электрод *2* присоединены к источнику постоянного тока *3* через рубильник и реостат. В камеру *4*, тангенциально, по трубе *5* подается газ (аргон), который, закручиваясь вихрем, охлаждает стенки камеры и наружные слои дуги, что способствует ее сжатию и разогреву. Сам газ, выходя через сопло *6*, приобретает температуру сжатой соплом плазмы и в виде факела *7* выходит из горелки. Обычно камеры горелок охлаждаются водой. Мощные плазмотроны постоянного тока питаются от блоков управляемых ионных вентилей, имеющих круто падающую внешнюю характеристику. Существуют плазмотроны трехфазного тока при $f = 50$ *гц*.

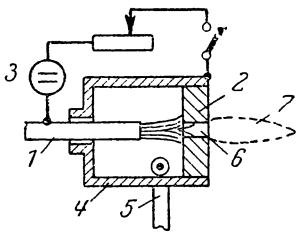


Рис. 17-17. Принцип устройства плазменной горелки.

Плазменная струя обладает многими положительными качествами. Она производит сварку, резку, наплавку, строжку самых твердых металлов и неметаллов; длина дуги здесь не определяет рабочего режима, так как работает плазменная струя. Наиболее широкое применение плазменная струя получила для резки материалов и особенно тугоплавких металлов и неметаллов, где обычная газовая резка не применима. Благодаря высокой температуре и газовому выдуванию расплавленного материала места среза практически не требуют последующей обработки, что совершенно необходимо при обычных дуговой и газовой резках. Скорость резки во много раз превышает скорости всех существующих способов. Резка под водой не нарушает работы горелки, так как факел газа препятствует попада-

нию в нее воды. Плазменные горелки очень часто используются для нанесения огнеупорных покрытий на любую поверхность, включая пластмассы и графит. В зависимости от операций ток дуги колеблется от 30 до 450 *а* при напряжении 20—80 *в*.

г) Электрический нагрев

Область науки, в которой рассматриваются способы преобразования электрической энергии в тепловую, называется электротермией. Электротермия широко применяется в промышленности. Производство высококачественной стали и сплавов повышенной стойкости к высокой температуре и агрессивной среде, производство ферросплавов и особо чистых металлов и полупроводников ведется только электротермическими способами. Этими способами производится карбид кальция, синтетический спирт и другие химические продукты, высокоогнеупорная керамика, сушка неметаллов и др. Коэффициент полезного действия электротермических установок, с учетом всех потерь при производстве и передаче электрической энергии, составляет 8—18%. Поэтому они применяются там, где другие установки не дают нужного эффекта.

д) Прямой электрический нагрев сопротивлением

На рис. 17-18 показана схема нагрева металлической детали *1*, зажатой охлаждаемыми водой контактами *2*, присоединенными ко вторичной обмотке *3* трансформатора. Первичная обмотка *4* секционирована для регулирования степени нагрева.

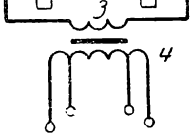


Рис. 17-18. Прямой электрический нагрев сопротивлением.

На рис. 17-19 показана установка для нагрева детали в электролите. Деталь *1* присоединяется к отрицательному зажиму источника постоянного тока и является катодом, корпус ванны *2* присоединяется к положительному зажиму. Ванна заполнена водным раствором щелочей или щелочных солей (Na_2CO_3, $MgCl_2$ и др.). При плотности тока $\Delta \approx 4 \div 16$ *а/см*^{2} при рабочем напряжении 200—250 *в* поверхность части детали, погруженной в электролит, быстро разогревается до температуры

800— 1200°. Нагрев происходит за счет реакций в газовой среде *3* (рис. 17-19), возникающих вокруг погруженной поверхности детали, и за счет искровых разрядов между деталью и электролитом.

Однако этот процесс протекает устойчиво только после тщательной отладки опытом, применительно к определенным, одинаковым операциям. Это не вызывает затруднения при массовом производстве однотипных деталей и позволяет автоматизировать производство. Последнее особенно важно ввиду применения повышенного напряжения и опасности его для обслуживающего персонала.

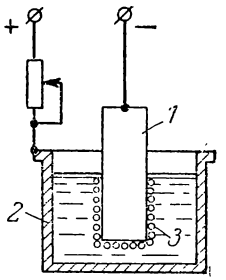


Рис. 17-19. Нагрев в электролите.

Если плотность тока выбрана заниженной и рабочее напряжение ниже разности потенциалов, необходимой для образования искр, то процесс не возникает и энергия расходуется на электролиз. При увеличенных плотностях тока процесс протекает неустойчиво.

Обработке подвергаются черные металлы и сплавы, графит, карбиды. Процесс эффективно применяется для получения гранулированных материалов (порошков, дроби). Нагрев происходит без окисления нагреваемой поверхности, с сохранением исходной точности и чистоты обработки и применяется при ведении процессов: горячей механической обработки, термической обработки, светлого отжига проволоки и тонких изделий, спекания и прессовки металлокерамических изделий и пайки металлов.

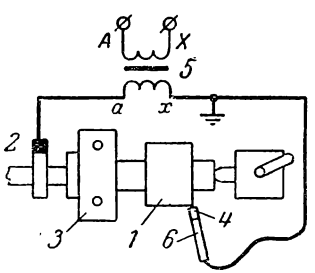


Рис. 17-20. Схема электроконтактного точения.

Электроконтактная обработка при простоте оборудования отличается высокой производительностью и эффективностью в черновых операциях: обдирке литья, зачистке поверхностей и черновом профилировании. Кроме того, возможны: затачивание, фрезерование, резание, очистка и др.

На рис. 17-20, для примера, показана схема электроконтактного точения. На токарном станке установлена де-

таль *1*, а к контактному приспособлению *2* планшайбы *3* и к резцу *4* подано напряжение от понижающего трансформатора *5*. Державка резца *6* охлаждается водой.

Процесс обработки состоит в том, что размягченный или расплавленный теплом, выделенным в месте контакта, металл удаляется гораздо легче, чем при обычном точении. Основные параметры: плотность тока, напряжение, скорость точения, давление, среда (воздух, вода) имеют для каждого случая свои величины и подбираются опытом. Большое преимущество способа в том, что возможна работа на переменном токе.

Вторичное напряжение при холостом ходе $U_2 = 2 \div 6$ *в*, а рабочее напряжение между деталью и резцом $U_р = 0{,}1 \div 3$ *в*. Ток короткого замыкания колеблется от 300 до 2 000 *а*, а рабочий ток — от 100 до 1 200 *а*. Плотность тока составляет 5—200 *а/мм*^{2}.

е) Косвенный нагрев сопротивлением

При этом способе ток подводится к специальным нагревательным элементам, а все устройство носит название электрической печи сопротивления. На рис. 17-21 показано одно из устройств такой печи. Нагреваемый предмет *1* помещен на под *2* теплоизолированной камеры *3*, закрываемой дверцой *4*. Обогрев камеры производится нагревателями *5*. Футеровка камеры уменьшает потери тепла во внешнюю среду и, нагреваясь, способствует равномерному нагреву детали *1*. В печах с температурой до 1 000—1 200° применяют элементы *5* из нихрома или железо-хромо-алюминиевых сплавов; при температуре печи от 1 200 до 1 350° применяются карборундовые нагревательные элементы или расплавленные соли. При более высокой температуре (в вакууме или другой защитной среде) пользуются графитом, вольфрамом, молибденом.

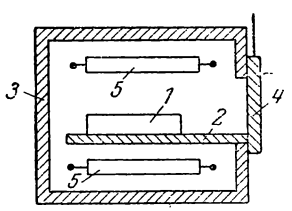


Рис. 17-21. Электрическая печь сопротивления.

Косвенный нагрев может производиться также инфракрасными лучами. В этом случае большая часть энергии нагретого проводника излучается в виде инфракрасных лучей. Для таких устройств применяют специальные лампы

инфракрасного излучения, которое получается направленным. Этот способ применяют для прогрева, сушки и выпечки в пищевой промышленности. Температура нагрева не превышает 200—300° С, экономичность его мала.

ж) Электродуговой нагрев

Устройства, в которых для расплавления металла применяется электрическая дуга, называются электрическими дуговыми печами. Наибольшее распространение получили печи трехфазного тока прямого действия, когда дуга замыкается через электроды и расплавляемый металл (рис. 17-22). Три графитовых электрода *A*, *B*, *C* присоединяются к вторичной обмотке специального (печного) трансформатора. Дуги горят между электродами и расплавляемым металлом *1*. Регулирование температуры производится одновременным автоматическим подъемом или опусканием электродов, а также переключением секций первичной обмотки трансформатора. Для ограничения тока последовательно с трансформатором включается реактор. Печи большой производительности (50—60 *т/ч* стали) потребляют мощность до 40 000 *квт*, печи средней мощности (3—5 *т/ч*) — до 1 000—4 000 *квт*.

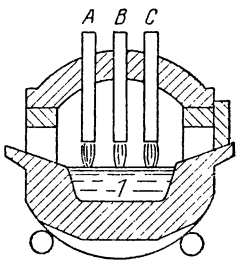


Рис. 17-22. Электрическая дуговая печь.

Вместо графитовых электродов могут применяться плазменные горелки (см. рис. 17-17). Печь в этом случае герметизирована и может применяться для плавки любых материалов от рафинированной меди до тугоплавких металлов: титана, циркония, молибдена, а также карбидов. В таких печах факел плазмы быстро расплавляет соприкасающиеся с нею верхние слои материала, который основной своей массой защищает от расплавления футеровку, что позволяет получать высокую чистоту продуктов плавки. Рабочим газом служит аргон.

з) Дуговые вакуумные печи

Современная техника немыслима без применения сверхпрочных, жаростойких, слабо взаимодействующих с химической средой материалов и сплавов. Основными компонен-

тами сплавов бывают никель, титан, молибден, цирконий и др. Обычные методы плавки оказываются не пригодными или благодаря тугоплавкости металлов (молибден, вольфрам), или потому, что даже плавка в тигле не дает необходимой чистоты металла, благодаря взаимодействию материала тигля с расплавляемым металлом. Все это привело к появлению дуговых вакуумных печей, схематическое устройство которых показано на рис. 17-23.

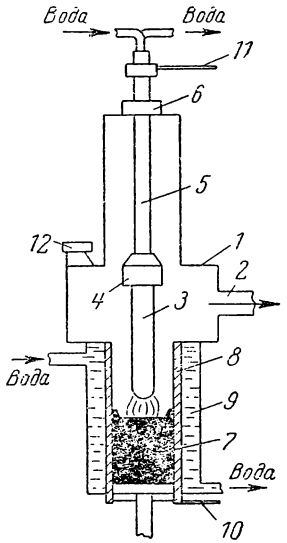


Рис. 17-23. Дуговая вакуумная печь.

Корпус печи *1* из нержавеющей стали присоединен патрубком *2* к вакуумному насосу, поддерживающему в печи вакуум $1 \cdot 10^{-2}$— $1 \cdot 10^{-3}$ *мм рт. ст.* Подлежащий переплавке металл в виде электрода *3*, зажатого в электрододержателе *4*, подвешен на водоохлаждаемом штоке *5*, проходящем через вакуумное уплотнение *6*. Плавящийся металл *7* остывает в медном кристаллизаторе *8*, охлаждаемом водой *9*. По токопроводам *10* и *11* ток подводится к кристаллизатору и расплавляемому электроду. Для наблюдения за ходом процесса имеется оптическое устройство *12* (гляделка).

Питают печи, по преимуществу, постоянным током. В этом случае генератор имеет две обмотки возбуждения: независимую и параллельную с соотношением н. с. $F_н = 30\% F_п$, при котором получается круто падающая внешняя характеристика (см. § 8-21). Напряжение холостого хода 40 *в*, а напряжение дуги 36—37 *в*, при токах 20 000—40 000 *а*. Для поддержания постоянства напряжения, а следовательно, обеспечения качественного строения слитка применяются автоматические регуляторы.

Для питания печей переменным током применяют трансформаторы с $U_н = 45 \div 53$ *в* и напряжением холостого хода 80 *в* при первичном напряжении $U_1 = 220$, 380 *в*, $\eta = 0{,}87 \div 0{,}89$ и $\cos\varphi = 0{,}62 \div 0{,}64$.

При ухудшении вакуума до 0,1—1 *мм рт. ст.* в печи возникает электрический объемный заряд; дуга перебра-

сывается на кристаллизатор и прожигает его. В корпусе печи получается смесь водяного пара и гремучего газа, что приводит к взрыву печи. Поэтому управление печью — дистанционное, печи ограждаются железобетонными стенами, а кристаллизатор помещается ниже уровня пола цеха. Трудности управления печью и недостатки качества слитков привели к поискам новой технологии плавки. Такой явилась плавка при помощи электронного луча.

и) Устройства плавки при помощи электронного луча

Электронно-лучевая плавка, помимо полной безопасности в работе, позволяет получать такую чистоту металлов, которая не достигается ни каким другим способом плавки. Плавка ниобия и тантала в сотни раз уменьшает содержание в них кислорода, азота и водорода. Становится возможной прокатка в тонкую фольгу этих, первоначально хрупких металлов при комнатной температуре. Плавка железа, никеля, меди и их сплавов практически полностью освобождает их от примесей свинца, олова, цинка, висмута и газообразных примесей. Электронно-лучевая плавка относительно очень экономична и позволяет переплавлять компактный металл, а также отходы в виде стружки и обрезков. Имеется возможность получения принципиально новых сплавов, так как смешивание может производиться в газообразном состоянии. Кроме того, испаряемый в вакууме металл позволяет получать мономолекулярные металлические пленки для микроэлектроники и новейших вычислительных устройств.

Принцип работы устройства заключается в следующем. Как в электронной лампе (см. гл. 13), подогревный катод эмиттирует электроны. Они попадают в электрическое поле, созданное между электродами, к которым приложено постоянное напряжение порядка $3 \div 35$ *кв*. В этом поле электроны разгоняются и запасают кинетическую энергию. Если на пути электронов попадается слиток металла или частица металла, то электроны при ударе отдают металлу свою кинетическую энергию и плавят его или превращают в пары. Устройство, где эмиттируются и разгоняются электроны, называется электронной пушкой (см. § 13-15). Металл попадает в кристаллизатор и остывает. Подобное явление существует в обычной электронной лампе, где электрон, достигая анода, производит

его нагрев. Однако там расплавление анода привело бы к аварии лампы.

На рис. 17-24 показана принципиальная схема устройства для электронно-лучевой плавки. Корпус устройства из нержавеющей стали состоит из двух камер: верхней *6*, выше разделительного шибера *1*, и нижней *7*. Камеры имеют независимые линии откачки *2* и *3*, при помощи которых поддерживается вакуум $1 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-4}$ *мм рт. ст.* Между катодом *4* и анодом *5* создается разгоняющее напряжение порядка 30—35 *кв*. Оно получается от трансформатора, включенного последовательно с селеновыми или кремниевыми выпрямителями, собранными по мостовой схеме. Тугоплавкий катод *4*, выполненный из вольфрама или тантала, имеет косвенный подогрев при помощи электронной бомбардировки (схема на рисунке не показана). Таким образом, верхняя камера *6* содержит электронную пушку.

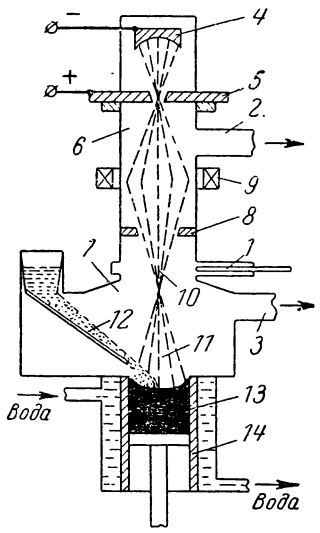


Рис. 17-24. Устройство плавки при помощи электронного луча.

При разгоняющем напряжении 30—35 *кв* мощность пушки может достигать 200—250 *квт*. При необходимости получения большей мощности в плавильной камере *7* ставят *2*, *3*, *4* пушки и более, каждая из которых охлаждается водой. При указанном напряжении только ничтожное количество электронов попадает на разгоняющий электрод *5*, а основная масса электронов образует мощный электронный луч, прорывающийся в плавильную камеру *7* через разделительную диафрагму *8*. Эта диафрагма имеет такое устройство, что, не задерживая электронов, препятствует прохождению газов из плавильной камеры *7* в камеру электронной пушки *6*. Короткая катушка (соленоид) *9* имеет внешний магнитопровод и служит для проведения электронного луча *10* через диафрагму *8*, а также для нужной фокусировки его в зоне плавки *11*. При необходимости электронный луч может быть остро сфокусирован на расплавляемом объекте.

Расплавляемый материал *12* в раздробленном виде или при другом устройстве в виде слитка подается в зону плавки *11*, где плавится электронным лучом и застывает в слиток *13* в кристаллизаторе *14*, охлаждаемом водой. При окончании плавки слиток охлаждается в вакууме, и специальным механизмом вытягивается из камеры плавки *7* в камеру выгрузки. Перед выгрузкой камера электронной пушки отделяется от камеры плавки разделительным шибером *1*. Советскими учеными созданы более совершенные устройства плавки электронным лучом, чем показано выше.

к) Индукционный нагрев металлов

При индукционных способах нагрева используется переменный ток и все устройства работают по принципу трансформатора со стальным сердечником или без него. На рис. 17-25 показана электрическая индукционная печь со стальным сердечником. Переменный ток при частоте 50 *гц* подается в первичную обмотку *1*, находящуюся на стальном магнитопроводе *2*. Вторичной обмоткой служит расплавленный металл канала *3*. Шахту *4*, через которую производится загрузка металла, покрывает огнеупорная футеровка *5*. Канал *3* имеет огнеупорный подовый камень *6*. Циркуляция расплавленного металла в канале, возникающая в результате электродинамических сил, передается в шахту *4*. Расплавленный металл периодически выпускается с тем, однако, чтобы часть расплава сохранялась в канале *3*. Эксплуатация печи должна быть непрерывной, а при останове печи весь металл из канала должен быть выпущен. Коэффициент полезного действия установки доходит до 0,85, а $\cos\varphi = 0{,}6 \div 0{,}7$. Печи этого типа одни из лучших для плавки цветных металлов и их сплавов.

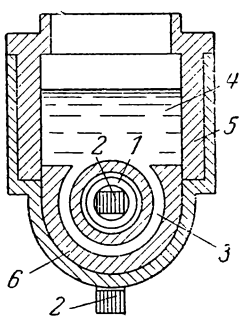


Рис. 17-25. Индукционная электрическая печь со стальным сердечником.

На рис. 17-26 показано устройство индукционной печи без стального сердечника. Тигель *1*, в котором плавится металл *2*, окружен первичной обмоткой *3*, выполненной из витков медной трубки, охлаждаемой проточной водой.

Шихта тигля *2* расплавляется под влиянием вихревых токов, вызываемых магнитным потоком первичной обмотки. Так как стального сердечника нет, то необходимая магнитная связь системы возможна только при питании ее токами повышенной (500 ÷ 2 500 *гц*) частоты или высокой (10^5 ÷ 10^6 *гц*) частоты. Для питания в первом случае применяются машинные генераторы, во втором — ламповые.

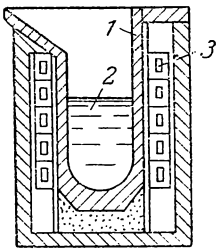


Рис. 17-26. Индукционная печь без стального сердечника.

Емкость тигеля этих печей — от нескольких кубических сантиметров до одного кубометра; печи применяются главным образом для плавки сталей. Они позволяют вести плавку в вакууме и получать высококачественный материал, при отсутствии угара металла и при к. п. д. до 0,8 ÷ 0,9. Коэффициент мощности их очень мал ($\cos\varphi \approx 0{,}3$), что заставляет применять средства для его улучшения.

Широкое применение в промышленности нашел м е т о д п о в е р х н о с т н о й з а к а л к и и н д у к ц и о н н ы м и т о к а м и в ы с о к о й ч а с т о т ы. На рис. 17-27 показана цилиндрическая деталь *1*, поверхность которой подвергается закалке. По спиральной обмотке *2*, выполненной из медной трубки, охлаждаемой водой, от высокочастотного генератора пропускается переменный ток большой величины при низком напряжении. Он наводит в поверхностном слое металла вихревые токи, которые за 3 ÷ 5 *сек* разогревают слой *3* до закалочной температуры. При закалке крупных деталей пользуются машинными генераторами мощностью 100—500 *квт* при частоте 500—15 000 *гц*. Ламповые генераторы при частоте более 100 000 *гц* применяются для деталей диаметром менее 30 *мм*. Детали диаметром более 200 *мм* закаливаются током промышленной частоты 50 *гц*. Для улучшения cos φ установки применяются конденсаторы.

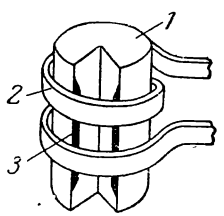


Рис. 17-27. Схема поверхностной закалки при помощи индуктора.

Закалка может производиться и при нагреве в электролите (рис. 17-19). Деталь *1* погружается в 5%-ный раствор

Na_2CO_3, через который пропускается постоянный ток напряжением 220 ÷ 380 *в*. Возникающая вокруг детали водородная рубашка очень высокого сопротивления быстро нагревается до 1 800—2 000° и за несколько секунд нагревает поверхность детали *1* до закалочной температуры. Деталь закаливают в том же электролите, выключив ток или сбрасывают ее в закалочный бак.

л) Обработка материалов когерентным световым лучом

Применение современных сверхтвердых, жаростойких материалов немыслимо без создания совершенно новых методов их обработки. Эти методы позволяют создавать, например, для микроэлектроники и для новейших вычислительных устройств такие элементы, как многослойные тонкопленочные схемы размером порядка одного квадратного миллиметра, с микросопротивлениями, микроконденсаторами, транзисторами, диодами и др., сверлить за десятую долю секунды в вольфраме и алмазе отверстия диаметром в несколько микрон и т. д.

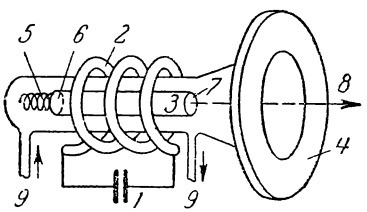


Рис. 17-28. Схема квантового генератора (лазера).

Ниже дается общее понятие об одном из видов современной технологии особо твердых материалов: металлов, сплавов, алмазов и др. при помощи луча квантового генератора (лазера), показанного на рис. 17-28.

От источника импульсного питания *1* к лампе-вспышке *2*, заполненной смесью неона и криптона и дающей зеленое свечение, подводится энергия. Световой импульс возбуждает атомы хрома рубинового стержня *3*, имеющего длину в несколько сантиметров и диаметр около сантиметра. Рубин помещен в держателе *4*, опирается на пружину *5* и охлаждается газом через трубки *9*. Торец рубина *6* зеркально посеребрен, а торец *7* посеребрен полупрозрачно.

Атомы хрома, переведенные вспышкой света на более высокий энергетический уровень (см. § 1—8) по минование светового импульса, могут самопроизвольно возвра-

щаться к исходному уровню, излучая порции (кванты) световой энергии. При этом происходит красное свечение рубина, подобное наблюдаемому, например, у рубиновых звезд Московского Кремля.

Однако лазер устроен так, что переход атомов хрома на прежний энергетический уровень происходит принудительно, согласованно по фазе (когерентно). Это объясняется следующим.

Электроны атомов хрома могут задержаться на высшем энергетическом уровне относительно долго — около одной тысячной доли секунды. Этого времени достаточно, чтобы мощная лампа-вспышка *2* перевела в возбужденное состояние более половины всех атомов хрома. Если затем осветить рубин слабым лучом красного света, то начнется переход атомов хрома на низший энергетический уровень с излучением квантов световой энергии. Световые волны, распространяясь вдоль оси рубина, многократно отражаются от посеребренных торцов рубина, вызывая возбуждение новых атомов хрома. Энергия света между торцами рубина лавинообразно нарастает и в определенный момент вырывается из полупосеребренного торца в виде ослепительного луча *8* (рис. 17-28).

Рубиновый лазер излучает импульсы света на волне около 0,7 *мк*. Длительность импульса около 0,001 *сек* с промежутками между ними в несколько микросекунд. За время одной вспышки лампы *2* происходит несколько сотен импульсов красного света. Луч лазера имеет яркость в миллион раз большую яркости солнца при одном и том же телесном угле и может быть остро сфокусирован. Этот луч обладает большой удельной мощностью и способен мгновенно нагревать и плавить предметы, находящиеся на его пути. Он сверлит десятки отверстий в минуту тогда, когда обычный инструмент не достигает цели, плавит и наносит тугоплавкие металлы на металл и керамику. Работа может производиться в воздухе, газах и вакууме. Советскими инженерами созданы станки с программным управлением, снабженные оптическими квантовыми генераторами.

За работы по квантовой электронике советские ученые Н. Г. Басов и А. М. Прохоров в 1959 г. были удостоены Ленинской премии, а в 1964 г. — Нобелевской премии.

м) Нагрев диэлектриков

Преобразование электрической энергии в тепловую можно получить и в диэлектрике, помещая его в электрическое поле высокой частоты. Мощность потерь в диэлектрике

$$P = 2\pi f C U_C^2 \operatorname{tg}\delta,$$

где C — емкость конденсатора, образованного электродами и диэлектриком, $\operatorname{tg}\delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь, равный отношению активного тока к реактивному при нагреве, а U_C — напряжение на обкладках конденсатора.

Для питания установок применяются ламповые генераторы — мощные триоды Г-450, Г-431 и др. Для увеличения мощности несколько одинаковых триодов включают параллельно. Повышение частоты и напряженности поля увеличивает мощность P, а следовательно, и нагрев. Однако значительное повышение напряжения встречает технические трудности и поэтому сбычно повышают частоту (практически от 100 *кгц* до 100 *Мгц*). Напряженность поля колеблется от сотен вольт до 2,5 *кв* на сантиметр. Диэлектрический нагрев применяется для сварки пластикатов, нагрева пресс-порошков, сушки древесины и конденсаторной бумаги, стерилизации пищевых продуктов и др.

17-4. ЭЛЕКТРОЭРРОЗИЙНАЯ ОБРАБОТКА

Метод электроэррозийной обработки существенно отличается от описанных выше. Он применяется ко всем токопроводящим материалам и в особенности к материалам высокой и сверхвысокой твердости. Диапазон применения его очень широк — от прошивки отверстий в распылителях и изготовления сеток электровакуумных приборов до ковочных штампов. Наибольшее применение этот метод находит в прошивке всевозможных полостей и отверстий.

Во всех случаях применения электроэррозийного метода создается эрозия — разрушение обрабатываемой поверхности электрическими разрядами. При этом подводимая электрическая энергия поступает в зону обработки импульсами через электроды, разделенные диэлектрической средой. Разделение энергии в промежутке между электро-

дами зависит от расстояния между ними. Для того чтобы почти вся энергия электрического разряда выделялась на поверхности электродов, расстояние между ними должно быть 3—5 *мк*. Разрушение электродов неодинаково. При разности потенциалов между ними менее 20 *в* разрушается быстрее анод, а при разности потенциалов свыше 40 *в* — катод.

При единичном (импульсном) разряде на обрабатываемой поверхности образуется лунка выброшенного металла, диаметр которой зависит от физических свойств металлов (потенциала ионизации, атомного веса), а глубина — от его теплофизических свойств. Для размерной обработки

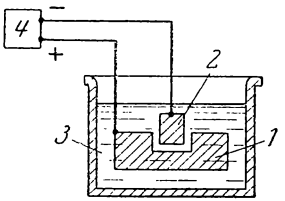


Рис. 17-29. Схема электроэррозийного прошивания отверстий.

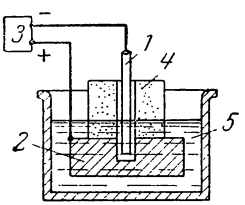


Рис. 17-30. Электроискровое прошивание малых отверстий.

необходимо, чтобы импульсы подводимой энергии были короткими по времени (300 ÷ 10 *мксек*) и подводились с частотой 400—35 000 *имп/сек*, а участок изделия, к которому подводится импульс, мал. Импульсы энергии подаются от специальных генераторов импульсов, описание которых выходит за пределы нашего изложения.

На рис. 17-29 показана схема электроэррозионного (электроискрового) прошивания полостей и отверстий. Между изделием — анодом *1* и инструментом — катодом *2* в диэлектрической среде *3* (минеральное масло) возникают импульсные искровые разряды. Под влиянием разрядов происходит разрушение, преимущественно анода, который может быть из любого металла или сплава. Катод обычно бывает выполнен из меди, латуни, металлографита, алюминиевых сплавов. Размеры и форма отверстия или полости соответствуют размеру и форме катода — инструмента, что широко используется для направленной размерной обработки. Импульсы энергии в зависимости от величины обрабатываемой детали, по 0,05—300 *дж*, подаются от специаль-

ного генератора *4*. Рабочее напряжение установки 70 ÷ ÷ 160 *в*, рабочий ток 1 ÷ 55 *а*. Класс точности обработки 3—5, класс чистоты 3—6.

На рис. 17-30 показано электроискровое прошивание малых отверстий ($d = 0{,}1 \div 0{,}15$ *мм*). Схема и принцип работы вполне подобны предыдущей. Катод из латунной проволоки *1* и анод, где прошивается отверстие *2*, присоединены к генератору импульсов *3*, посылающему импульсы с энергией $0{,}3 \cdot 10^{-2} \div 0{,}4 \cdot 10^{-3}$ *дж*. Так как диаметр катода очень мал, то для придания ему жесткости он пропущен сквозь направляющий кондуктор *4* из изоляционного материала. Ванна заполнена минеральным маслом *5*. Катоду, специальным приспособлением, сообщаются вибрации в направлении прошивания с амплитудой 0,15—0,3 *мм*. Рабочее напряжение установки $U_р = 70 \div 200$ *в*, а рабочий ток $I_р = 0{,}05 \div 0{,}4$ *а*. Класс точности обработки 1—2, класс чистоты 6—7.

17-5. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА

Обработка с помощью химической, электрической или механической энергии, при наличии упругих механических колебаний с частотой 16 000 *гц* и выше называется ультразвуковой. Ультразвуковые колебания используются как средство интенсификации химических или электрохимических процессов, или для передачи механических колебаний в зону обработки. Наибольшее распространение получили операции размерной обработки твердых и хрупких материалов, очистки поверхностей и жидкостей, пайки и лужения металлов с легко окисляющейся поверхностью.

Источником ультразвуковых колебаний служат механические или электрические устройства, последние и рассматриваются ниже. В электрических устройствах используют пьезоэлектрические и магнитострикционные преобразователи электрических колебаний в механические — ультразвуковые. Как говорилось выше, кварцевая пластинка, помещенная в электрическое поле, обладает способностью менять свои размеры. Такой же способностью обладают ферромагнитные материалы (никелевые и никель-цинковые ферриты), будучи помещенными в магнитное поле. Это явление называют магнитострикцией и используют в магнитострикционных ультразвуковых устройствах.

На рис. 17-31 упрощенно показано устройство магнитострикционного вибратора. Ферритовый пакет-магнитопровод *1* имеет обмотку *2*, получающую ток от специального генератора при частоте $f = 16 \div 25$ *кгц*. Пакет крепится в корпусе, не показанном на рисунке, и охлаждается водой. Для увеличения амплитуды колебаний до необходимой величины (10 ÷ 100 *мк*) пакет механически соединен с трансформатором колебаний *3*, ограничивающие поверхности которого построены по экспоненциальной кривой. К трансформатору пайкой или на резьбе крепится обрабатывающий инструмент *4*.

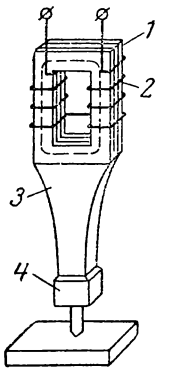


Рис. 17-31. Устройство магнитострикционного вибратора.

Вибрации этого инструмента позволяют вести размерную обработку твердых и хрупких материалов, т. е. получать полости и отверстия по форме, представляющие негативное повторение формы обрабатывающего инструмента. Обработка ведется в водной суспензии абразивного порошка.

На рис. 17-32 показан способ ускорения очистки деталей от механических и жировых загрязнений, при помощи магнитострикционного вибратора *1*. К дну ванны *2* с растворителем, в который погружаются очищаемые изделия, вибратор присоединен при помощи согласующей акустической мембраны *3*. Ультразвуковые колебания вибратора передаются мембраной раствору и ускоряют процесс очистки. Таким способом очищаются детали часов, подшипников, медицинских инструментов, деталей электровакуумных приборов и др.

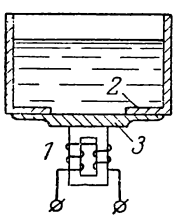


Рис. 17-32. Способ ускорения очистки деталей от механических и жировых загрязнений.

Очень эффективной оказывается ультразвуковая пайка и лужение легко окисляющихся металлов (алюминий, новые легкие и специальные сплавы). При этом способе пайки главную роль играет так называемая к а в и т а ц и я. При достаточной мощности колебаний звука образуются сильные ударные волны, создающие в жидкой среде припоя пузырьки с давлением в тысячи атмосфер. Гидравлические удары разрушают окис-

ную пленку на поверхности металла и открывают доступ к нему припоя. При этом отпадает необходимость во всякого рода флюсах.

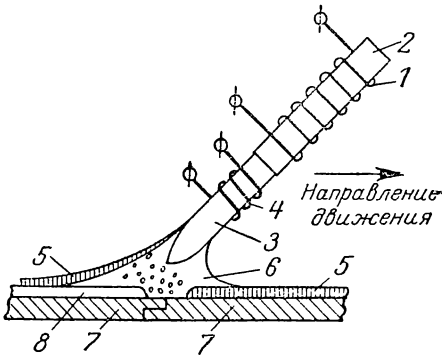


Рис. 17-33. Ультразвуковой паяльник.

На рис. 17-33 показан ультразвуковой паяльник. Механические колебания возбуждаются током высокой частоты, проходящим по обмотке *1* магнитострикционного пакета *2*. Тело паяльника *3*, как обычно, имеет нагревательную обмотку *4*. Пленка окиси металла *5* в зоне нагрева разрывается упругими колебаниями и припой *6*, получив доступ к металлу *7*, покрывает его прочным слоем *8*.

17-6. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

а) Принцип действия

Устройства, в которых создано электрическое поле, воздействующее на обрабатываемый материал, но не вызывающее химических изменений в последнем, называется электростатическими установками. В этих установках, под влиянием электростатического поля, макрочастицы вещества перемещаются в определенном направлении силами, действующими в поле. Поэтому такие установки применяются для очистки газов, сортировки и разделения сыпучих смесей на составляющие их части, очистки воды, выделения фракций из коллоидных растворов, окрашивания в электрическом поле и др.

Во всех случаях нейтральные частицы вещества предварительно должны быть заряжены электрически либо

контактным способом, либо электризацией в электрическом поле. Первый способ применим к сыпучим сухим смесям, второй — к частицам, взвешенным в газах или жидкостях.

б) Разделение сыпучих смесей на составляющие

На рис. 17-34 показана схема установки для электростатического разделения продуктов помола зерна. Из бункера *1* помол поступает на потрясок (лоток) *2*, который встряхивается вращающимся эксцентриком *3*. Потрясок одновременно служит заряжающим частицы электродом. Заряженные частицы падают между двумя электродами *4*, разность потенциалов между которыми составляет десятки киловольт. Под влиянием сил, по закону Кулона, чистый помол отделяется от оболочек зерна (отрубей) и сортируется по ячейкам приемника *5*. Трансформатор *6* и выпрямитель *7* служат для получения постоянного напряжения на электродах *4*. Производительность устройства зависит от ширины лотка *2* и составляет около 100 *кг* на 1 *см* ширины лотка в сутки. Потребляемая мощность устройства равна около 500 *вт* на 1 *м* ширины лотка.

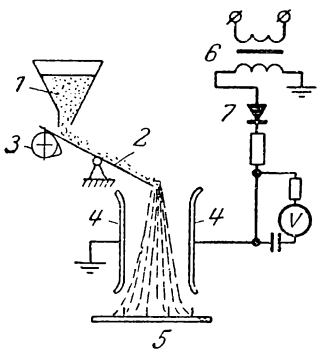


Рис. 17-34. Электростатическая установка для разделения составляющих помола муки.

в) Электростатическая очистка газов

Электростатические устройства для очистки газов называются электрофильтрами (рис. 17-35). Так же как и в предыдущем случае, частицы пыли, золы, цемента, поступающие с газом на вход фильтра *5*, должны быть предварительно заряжены. Однако они взвешены в газе и контактная электризация их невозможна. Поэтому в фильтрах для электризации частиц используется коронный разряд. В корпусе фильтра *1* (рис. 17-35), при помощи проходного изолятора *2*, установлен центральный элек-

трод *3*. Источником высокого напряжения *4*, между корпусом фильтра и центральным электродом, создается разность потенциалов и при определенном ее значении на электроде *3* возникает коронный разряд. В газе получается поток электронов, направленный к корпусу *1*. Этими электронами и заряжаются посторонние частицы, содержащиеся в газе. Заряд частиц нейтрализуется при достижении ими корпуса фильтра *1*, они осаждаются на нем и удаляются из фильтра.

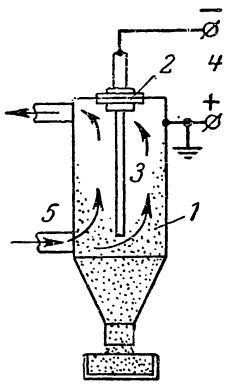


Рис. 17-35. Электрический фильтр.

г) Электростатическая окраска металлических изделий

На рис. 17-36 схематически показано устройство для окраски или эмалирования металлических изделий. На заземленном конвейере *1* подвешены изделия *2*, подлежащие окраске. Они движутся в окрасочной камере *3*, внутри которой на изоляторах *4* подвешены рамы *5* с натянутой сеткой из тонких проводов. Эти провода через изоляторы *4* присоединены к отрицательному зажиму источника высокого напряжения *6* и являются коронирующими электродами. При высоком напряжении (до 150 *кв*) возникает коронный разряд и частицы краски, вдуваемой через сопло *7* пневматического распылителя, заряжаясь отрицательно, движутся к положительно заряженным изделиям конвейера и осаждаются на них, покрывая их плотным слоем. Окрасочная камера снабжается специальным вытяжным устройством *8*. Мощность источника высокого напряжения обычно не превышает 150 *вт*. Электроокраска широко применяется в производстве автомашин, сельскохозяйственных машин, электротехнического оборудования и др.

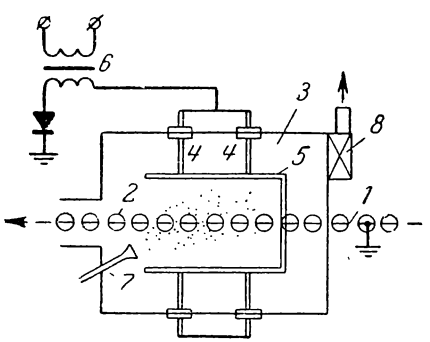


Рис. 17-36. Электростатическая окраска изделий.

д) Электростатическая отделка изделий из древесины

По сравнению с электроокраской металлических изделий отделка изделий из древесины имеет ряд особенностей. Это связано с тем, что к покрытиям древесины лаком предъявляются очень высокие декоративные требования. Предварительная обработка древесины должна давать чистоту поверхности, соответствующую 9—10 классу. В противном случае, при ворсистости окрашиваемой поверхности, вокруг ворсинок и любых острых выступов может возникать обратная корона, которая ведет к непрокрашиванию участков поверхности.

Вторая особенность состоит в том, что сухая древесина плохой проводник тока. Поэтому обрабатываемая древесина должна иметь относительную влажность не менее 8%. Для увеличения электропроводности древесины в состав грунта при ее подготовке иногда добавляется фосфорная кислота.

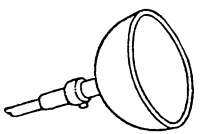


Рис. 17-37. Распылитель для электростатической окраски.

При окраске изделие всегда соединяется с заземленным положительным зажимом источника высокого напряжения (80—150 *кв*), а распыление производится электромеханическим способом. При нем распылитель имеет форму, например, чаши (рис. 17-37), которая вращается при помощи электродвигателя со скоростью не более 1 500 *об/мин* и присоединяется к зажиму минус источника высокого напряжения. Распыляющийся при вращении лак заряжается отрицательно у острых краев чаши и переносится силами электрического поля на изделие. Так как ток при окраске не превышает 0,2—2 *ма*, то в качестве источников высокого напряжения применяются полупроводниковые вентили, кенотроны и специальные электростатические генераторы.

Экономия в лакокрасочных материалах при электроокраске достигает 40% и более по сравнению с обычной окраской распылением. Затраты труда сокращаются на 30%, а производительность вырастает в несколько раз.

При электростатической окраске, особенно в деревообделочной промышленности, должны строго соблюдаться правила техники безопасности и противопожарной техники. Помещение электрокрасочной установки изолируется

от других помещений, где образуется древесная пыль. Частицы этой пыли становятся для человека особенно вредны после того, как они попали в зону электростатического поля и зарядились. Во избежание поражения людей током источники высокого напряжения мощностью более 150 *вт* не рекомендуются. Камера окраски и другие части, нормально не находящиеся под напряжением, заземляются. Сопротивление заземления не должно превышать 2 *ом*. Для установки рекомендуется устраивать отдельное заземление, не связанное с заземлением нулевой точки трансформатора подстанции. При отключении установки, особенно распылителей, остаточные статические заряды должны быть сняты разрядником. В качестве противопожарных мер должно быть предусмотрено все, во избежание перехода коронного разряда в искровой и дуговой и, следовательно, воспламенения лака и древесной пыли.

е) Электроосмотическая очистка воды

Проблема получения питьевой воды и пресной воды для технических целей становится в данное время очень важной. В связи с реальными возможностями выработки большого количества электрической энергии атомными установками может быть разрешена задача опреснения воды морей и океанов. Схема электроосмотической очистки воды, показанная ниже, дает возможность очищать воду, имеющую в одном литре до нескольких сот миллиграммов сухого остатка.

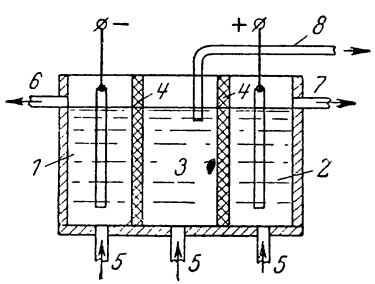


Рис. 17-38. Электроосмотическая очистка воды.

На рис. 17-38 представлена ячейка (сосуд), разделённая на три отделения диафрагмами *4* из замши, керамики, пергамента и др. В первое и второе отделения погружены электроды, присоединенные к источникам электроэнергии. По трубам *5* в ячейку поступает очищаемая вода. Содержащиеся в воде соли Na_2SO_4, $CaSO_4$, $CaHCO_3$ и др. диссоциируют на катионы H^+, Ca^+, Na^+, движущиеся к катоду в отделение *1* и анионы OH', SO_4'', HCO_3', идущие к аноду,

в отделение *2*. Из этих отделений щелочная и кислая вода удаляются по трубам *6* и *7*. Обедненная солями вода отделения *3* по трубе *8* подается во вторую ячейку, соединенную последовательно с первой и т. д. К ячейкам подводится напряжение 110 и 220 *в* причем так, что напряжение, приходящееся на каждую ячейку последовательной цепи, постепенно нарастает. Последовательные группы ячеек могут соединяться между собой параллельно.

ГЛАВА ВОСЕМНАДЦАТАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОСВЕЩЕНИЕ

18-1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЕДИНИЦЫ

Свет — необходимое условие для работы. Хорошее освещение является одним из условий повышения производительности труда, уменьшения брака, улучшения качества продукции и снижения производственного травматизма.

Для электрического освещения в большинстве случаев используется лучистая энергия накаленной до температуры около 3 000° вольфрамовой нити лампы накаливания.

Отношение той части лучистой энергии, которая воспринимается человеческим глазом как световое ощущение, к времени, в течение которого она излучается, называется световым потоком (F). Таким образом, световой поток представляет собой мощность лучистой энергии, воспринимаемой человеческим глазом.

Так как световой поток источников света распределяется в пространстве неравномерно, то их характеризуют еще величиной пространственной плотности потока в различных направлениях. Пространственная плотность потока определяется световым потоком, отнесенным к единице телесного угла, носящим название силы света (I).

Следовательно, сила света

$$I = \frac{F}{\omega}.$$

Телесным углом (ω) называется часть пространства, ограниченная конической поверхностью. Отношение части площади сферы S, на которую опирается телесный угол,

к квадрату радиуса сферы определяет величину телесного угла

$$\omega = \frac{S}{R^2}.$$

При $S = R^2$, $\omega = 1$. Таким образом, за единицу телесного угла принят угол, вырезающий на поверхности сферы площадь, равную квадрату радиуса сферы. Эта единица называется стерадиан (*стер*).

Согласно ГОСТ 9867-61 основной световой единицей системы СИ является единица силы света — свеча (*св.*). Свеча равна силе света в перпендикулярном направлении плоской поверхности абсолютно черного тела площадью 1,6667 *мм*^{2} при температуре затвердевания платины $T = 2\,046°$ К.

Единицей светового потока служит люмен (*лм*) — световой поток, излучаемый источником силой света в 1 *св* в телесный угол, равный 1 *стер*. Таким образом,

$$1\ лм = 1\ св \cdot 1\ стер.$$

Например, лампа накаливания с номинальным напряжением 127 *в*, мощностью 100 *вт* дает световой поток $F = 1\,320$ *лм*.

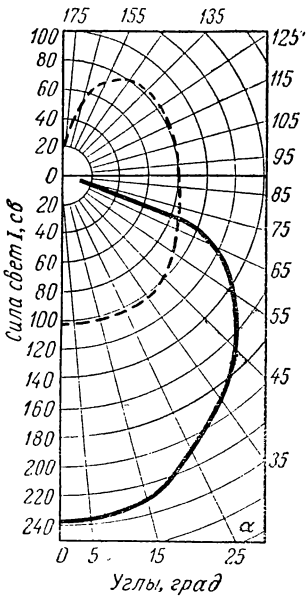


Рис. 18-1. Продольные кривые распределения силы света.

Как уже отмечалось, сила света ламп и осветительных приборов неодинакова в различных направлениях. Распределение силы света источником в различных направлениях обычно дается кривыми, построенными в полярных координатах.

Пунктирная кривая (рис. 18-1) дает продольное распределение силы света лампы накаливания мощностью 100 *вт* с номинальным напряжением 220 *в*. Длина отрезка радиуса от полюса 0 до точки пересечения с кривой в определенном масштабе дает значение силы света в направлении радиуса. Например, сила света в направлении

радиуса, расположенного под углом 45°, равна 100 *св.* Так как лампа обладает осью симметрии, то для нахождения силы света под углом больше 180° надо построить вторую половину кривой, представляющую зеркальное изображение первой. Сплошная кривая (рис. 18-1) дает распределение силы света для той же лампы с арматурой «Универсаль».

Так как сила света источника различна в разных направлениях, то часто источник характеризуют средней сферической силой света, представляющей собой отношение полного светового потока источника к телесному углу сферы (4π), т. е.

$$I_0 = \frac{F}{4\pi}.$$

Таким образом, средняя сферическая сила света источника представляет собой среднюю плотность светового потока, показывая, какой будет сила света, если световой поток источника распределить равномерно во всех направлениях. Так, для лампы, рассмотренной в предыдущем примере, средняя сферическая сила света

$$I_0 = \frac{F}{4\pi} = \frac{1\,320}{4 \cdot 3{,}14} \approx 100 \text{ } св.$$

Световой поток, падая на поверхность, освещает ее. Интенсивность освещения оценивается отношением светового потока к площади равномерно освещаемой им поверхности, которое называется о с в е щ е н н о с т ь ю (E):

$$E = \frac{F}{S}.$$

Полагая $F = 1$ *лм* и $S = 1$ *м*^{2}, получим единицу измерения освещенности, называемую л ю к с о м (*лк*):

$$1 \text{ } лк = \frac{1 \text{ } лм}{1 \text{ } м^2}.$$

При использовании ламп накаливания наименьшая допустимая освещенность помещений для выполнения работы в зависимости от ее характера и ряда условий устанавливается нормами освещенности в пределах $50 \div 500$ *лк*.

Видимость предмета характеризуется я р к о с т ь ю (B), представляющей отношение силы света, излучаемого поверхностью, к величине этой поверхности. Таким обра-

зом, яркость в направлении, перпендикулярном к поверхности (рис. 18-2):

$$B_н = \frac{I_н}{S}.$$

Яркость в направлении прямой, проведенной под углом α к нормали (рис. 18-2):

$$B_\alpha = \frac{I_\alpha}{S \cos \alpha}.$$

Выражая силу света в свечах, а площадь в квадратных метрах, получим яркость в свечах на квадратный метр. Эта единица яркости носит название нит (*нт*):

$$1\ нт = \frac{1\ св}{1\ м^2}.$$

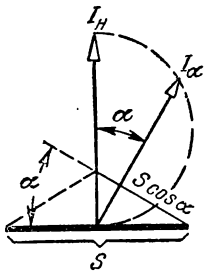


Рис. 18-2. Яркость светящейся поверхности.

Нит — это яркость равномерно светящейся плоской поверхности, создающей, в перпендикулярном к ней направлении, силу света в 1 *св* с 1 $м^2$.

Зрительное восприятие, вызванное изображением предмета на светочувствительной оболочке глаза, будет тем сильнее, чем больший световой поток попадает в глаз от каждого элемента освещенной или светящейся поверхности. Следовательно, большей силе света, излучаемой каждой единицей поверхности тела, соответствует лучшая видимость предмета.

Световой поток, падающий на тело, делится на три части. Одна часть светового потока (F_0) отражается от поверхности тела. Вторая часть проходит через тело и распространяется по другую сторону его. Наконец, третья часть потока поглощается телом. В зависимости от физических свойств тел, а также от характера и состояния поверхности указанные слагающие могут иметь различные значения.

Отношение отраженного потока F_0 к падающему на это тело потоку $F_п$ носит название коэффициента отражения

$$\rho = \frac{F_0}{F_п}.$$

По значению коэффициента отражения поверхности можно разделить: на светлые (ρ = 0,5—0,8), на средние (ρ = 0,2—0,5) и на темные (ρ = 0,06—0,2).

18-2. ИСТОЧНИКИ СВЕТА

В настоящее время наиболее широкое применение для освещения получили лампы накаливания и люминесцентные лампы.

Лампа накаливания изобретена в 1873 г. русским инженером А. Н. Лодыгиным, а затем была усовершенствована Эдисоном.

Устройство общеизвестных ламп накаливания показано на рис. 18-3.

Нормальные лампы накаливания мощностью до 40—60 *вт* изготовляются вакуумными, а лампы на большую мощность — газонаполненными. Наполнение лампы газом (смесь аргона и азота) уменьшает распыление вольфрамовой нити лампы, вследствие чего увеличивается срок службы ее.

А. Н. Лодыгин (1847—1923).

Наполнение ламп газовой криптоно-ксеноновой смесью дает увеличение срока службы и экономичности лампы на 30—40%. Этому способствует также уменьшение потери энергии вследствие теплопроводности газа, благодаря применению биспиральной нити накала, представляющей собой спираль, свернутую из спиральной проволоки.

Лампы накаливания характеризуются: 1) номинальным напряжением; 2) номинальной мощностью; 3) световым потоком; 4) световой отдачей, т. е. отношением светового потока к мощности потребляемой лампой, характеризующей экономичность лампы; 5) сроком службы. Характеристики ламп накаливания даны в табл. 18-1.

Срок службы зависит, главным образом, от распыления вольфрамовой нити. При высокой температуре накала нити вольфрам испаряется, оседая на стенки колбы, образуя темный налет, поглощающий световой поток. Поэтому нормальным сроком службы лампы считается продолжительность горения ее при $U_н$ до уменьшения светового потока на 20% от начального значения. При большем уменьшении светового потока эксплуатация лампы нецелесообразна. Нормальный срок службы лампы считается 1 000 *ч*.

Срок службы лампы, световой поток и отдача ее в очень сильной степени зависят от напряжения (рис. 18-4), поэтому лампа должна работать или при номинальном напряжении или напряжении, незначительно отличающемся от номинального.

Люминесцентная лампа (рис. 18-5) состоит из стеклянной трубки *1*, на концах которой укреплены цоколи *2*, с вольфрамовыми биспиральными электродами *3*, покрытыми пленкой окиси бария, облегчающей эмиссию. После откачки воздуха в трубку вводится некоторое количество ртути и аргона.

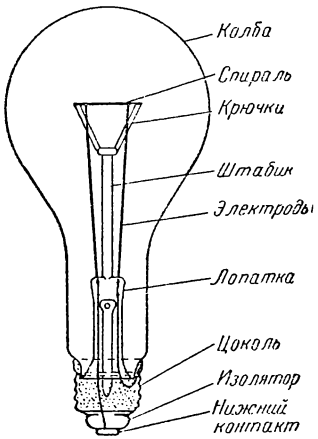


Рис. 18-3. Лампа накаливания.

Внутренняя поверхность трубки покрыта люминофором или смесью люминофоров. Смесь люминофоров светится в результате воздействия на нее ультрафиолетового излучения паров ртути, которое возникает при движении через них электронов под действием электрического поля, созданного между электродами.

Таблица 18-1

Характеристики ламп накаливания

Мощность, *вт*	110 и 127 *в*		220 *в*	
	световой поток, *лм*	световая отдача, *лм/вт*	световой поток, *лм*	световая отдача, *лм/вт*
25	228	9,1	198	7,9
40	380	9,5	340	8,5
60	660	11	540	9,0
75	915	12,2	698	9,3
100	1 320	13,2	1 050	10,5
150	2 280	15,2	1 845	12,3
200	3 200	16,0	2 660	13,3
300	5 160	17,2	4 350	14,5
400	7 000	17,5	6 000	15,0
500	9 100	18,2	8 000	16,0

Люминофоры в зависимости от их состава дают световой поток разных цветов. Подбором люминофоров можно получить лампы с излучением, близким к дневному свету.

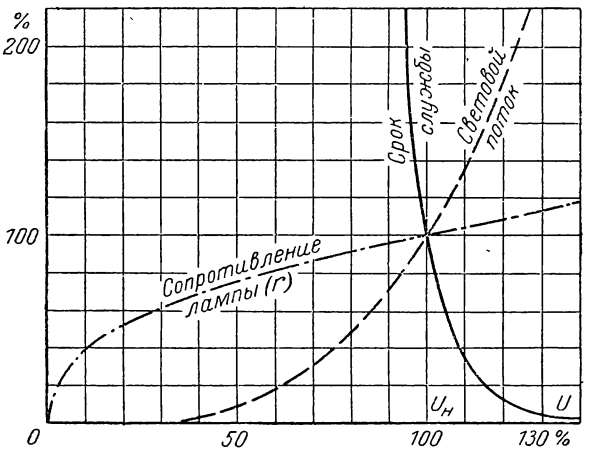


Рис. 18-4. Характеристики ламп накаливания в зависимости от напряжения.

Срок службы люминесцентных ламп 3 000 *ч*. Коэффициент полезного действия их около 6%, т. е. в 2,5—3 раза больше, чем у ламп накаливания. Ввиду их экономичности их следует рекомендовать для широкого применения.

По цветности излучения люминесцентные лампы делятся: 1) лампы дневного света — *ДС*; лампы белого света — *БС*; 3) лампы холодно-белого света — *ХБС* и 4) лампы тепло-белого света — *ТБС*.

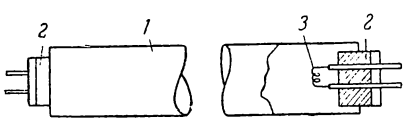


Рис. 18-5. Люминесцентная лампа.

Лампы *ДС* и *ХБС* применяются для освещения работ, требующих безошибочного определения цветовых оттенков. Лампы *БС* и *ТБС* применяются при необходимости иметь цветность освещения, близкой к естественному.

Характеристики люминесцентных ламп даны в табл. 18-2.

Дроссель *1* для ограничения тока, электроды *2* лампы и стартер *3* соединены последовательно (рис. 18-6). Стартер представляет собой маленькую неоновую лампочку, один электрод которой биметаллический.

Таблица 18-2

Характеристика люминесцентных ламп

Мощность, *вт*	Напряжение, *в*	Напряжение на лампе, *в*	Ток лампы, *а*	Длина трубки, *мм*	ДС		ХБС		БС		ТБС	
					Световой поток, *лм*	Световая отдача, *лм/вт*	Световой поток, *лм*	Световая отдача, *лм/вт*	Световой поток, *лм*	Световая отдача, *лм/вт*	Световой поток, *лм*	Световая отдача, *лм/вт*
15	127	58	0,30	451	490	32,6	490	32,6	560	37,3	500	33,3
20	127	60	0,35	604	700	35,0	700	35,0	800	40,0	700	35,0
30	220	108	0,32	909	1 160	38,6	1 160	38,6	1 400	46,6	1 250	41,6
40	220	108	0,41	1 213	1 700	42,5	1 700	42,5	1 920	48,0	1 780	44,5
80	220	108	0,80	1 481	3 040	38,0	—	—	3 440	43,0	3 200	40,0

При замыкании выключателя *4* напряжение сети прикладывается к разомкнутым электродам стартера и между ними возникает тлеющий разряд. Биметаллический электрод, нагревшись, замкнет электроды стартера накоротко и в цепи появится ток, нагревающий электроды *2* лампы. При замыкании электродов стартера тлеющий разряд прекратится и биметаллический электрод, охладившись, разорвет цепь стартера. При этом между разогретыми электродами *2* лампы появится напряжение и в лампе возникнет разряд, сопровождаемый свечением, т. е. лампа зажжется. Конденсатор *5* предназначен для устранения радиопомех. Конденсатор *6* применяется для повышения коэффициента мощности и устранения стробоскопического эффекта.

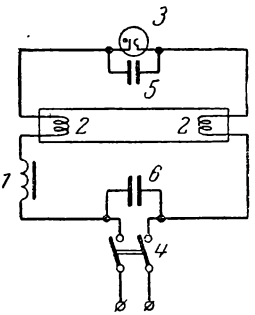


Рис. 18-6. Схема включения люминесцентной лампы.

За последнее время для освещения улиц, открытых пространств и больших высоких производственных помещений значительное распространение получили дуговые ртутные люминесцентные лампы — *ДРЛ*.

Внутри внешней овальной стеклянной колбы *2* (рис. 18-7) расположена ртутная лампа высокого давления с цилиндрической колбой *1* из кварцевого стекла. Несмотря на экономичность ртутных ламп, применение их затруднялось отсутствием в их спектре оранжево-красных лучей. В лампах *ДРЛ* этот недостаток устранен путем получения от люминофора покрывающего внутреннюю поверхность (*3*) овальной колбы оранжево-красного излучения, которое возникает под действием ультрафиолетового излучения ртутной лампы. Таким образом, спектр лампы становится

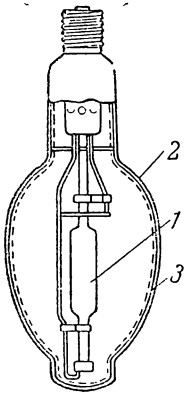


Рис. 18-7. Лампа ДРЛ.

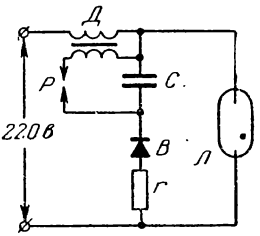


Рис. 18-8. Включение лампы ДРЛ.

близким к спектру дневного света. Эти лампы выпускаются мощностью 250—500—750 и 1 000 *вт*.

Включение *ДРЛ* производится при помощи специального пускового прибора (рис. 18-8), состоящего из дросселя *Д* и импульсного контура с разрядником *Р*. При включении напряжения конденсатор *С* заряжается через селеновый выпрямитель и ограничивающее сопротивление *r*. При повышении напряжения на конденсаторе до некоторого значения он разрядится, вследствие чего на первичной обмотке дросселя возникнет импульс напряжения, зажигающий лампу. При горении лампы напряжение на конденсаторе ниже пробивного напряжения разрядника и разрядов не происходит.

18-3. ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Осветительные приборы делятся на две группы: приборы ближнего действия для освещения на расстоянии до 20—30 *м* — с в е т и л ь н и к и и приборы дальнего действия — п р о ж е к т о р ы.

Светильник состоит из лампы и арматуры, имеющей целью: 1) рационально распределить световой поток; 2) защитить глаза от излишней яркости; 3) защитить лампу от повреждений и загрязнений.

Коэффициентом полезного действия светильника называется отношение излучаемого им светового потока к световому потоку лампы, т. е.

$$\eta_{св} = \frac{F_{св}}{F_л}.$$

Мерой защиты глаз наблюдателя от ярких частей источника света служит защитный угол (рис. 18-9), в пределах которого яркие части невидны глазу.

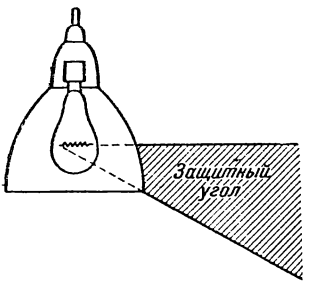


Рис. 18-9. Защитный угол светильника.

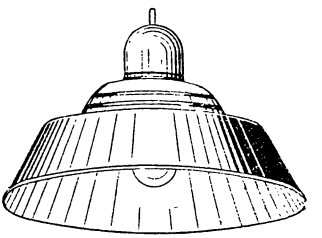


Рис. 18-10. Светильник «Универсаль».

Основными характеристиками светильников являются: 1) кривая распределения силы света; 2) к. п. д. $\eta_{св}$; 3) защитный угол.

Светильники по характеру распределения светового потока делятся на три группы: 1) светильники прямого света — класса *П*; 2) светильники отраженного света — класса *О* и 3) светильники рассеянного света — класса *Р*.

Светильники прямого света не менее 90% светового потока излучают в нижнюю полусферу. К этому классу относится светильник «Универсаль» (рис. 18-10), кривая распределения света которого дана на рис. 18-1. Он применяется для освещения производственных помещений с высотой до 8 *м*. Светильник «Универсаль» (условное обозначение *У*) состоит из стального колпака, покрытого внутри белой эмалью, в котором укрепляется лампа мощностью до 500 *вт*. Иногда светильник применяется с затенителем

из матированного стекла (обозначение — $У_м$). Коэффициент полезного действия его 70%, а с затенителем 58%. Защитный угол светильника 14°. Высота подвеса не менее 3 *м*.

К тому же классу *П* относится светильник «Глубокоизлучатель» (рис. 18-11) эмалированный (обозначение $Г_в$), рассчитанный на лампу до 1 000 *вт*, имеющий к. п. д. 58% и защитный угол 27°. Светильник широко применяется для освещения производственных помещений с высотой подвеса не более 12 *м*. Наименьшая высота подвеса 3 *м*.

Светильники отраженного света не менее 90% светового потока излучают в верхнюю полусферу. Они имеют раз-

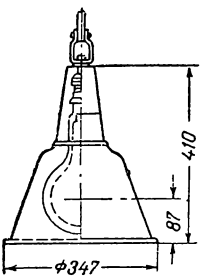


Рис. 18-11. Светильник «Глубокоизлучатель».

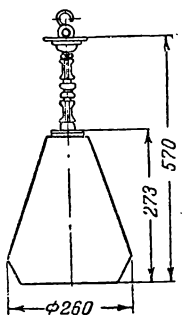


Рис. 18-12. Светильник «Люцетта».

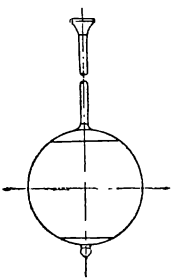


Рис. 18-13. Светильник «Шар молочного стекла».

нообразную форму в соответствии с их назначением и архитектурным оформлением помещения.

Светильники рассеянного света менее 90% излучают в нижнюю полусферу и более 10% в верхнюю полусферу.

К этому классу относится широко распространенный светильник «Люцетта» ($Л_ц$), показанный на рис. 18-12. Он представляет собой двойной усеченный конус из молочного или матированного стекла, рассчитанный на лампу до 200 *вт*, имеющий к. п. д. 75% и защитный угол 36°. Светильник применяется для освещения административных, торговых, лечебных, проектных, учебных и производственных помещений с малым содержанием пыли при высоте подвеса 3 ÷ 5 *м*.

К этому же классу относятся светильник Шар молочного (опалового) стекла (рис. 18-13) и Кольцевой светильник (рис. 18-14) типа СК-300. Последний имеет пять сталь-

ных затенительных колец *1*, скрепленных между собой, три кронштейна *2* и корпус с патроном *3*. Светильник окрашен белой эмалевой краской. Его к. п. д. 80%. Наименьшая высота подвеса 2,5 *м*.

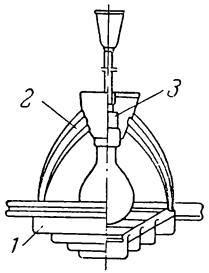


Рис. 18-14. Светильник с кольцевыми затенителями типа СК-300.

Для освещения рабочих мест дополнительно к общему освещению применяется светильник «Альфа» (рис. 18-15). Он рассчитан на лампу до 75 *вт*. Его к. п. д. 50%.

Для люминесцентных ламп применяется ряд светильников.

Светильники типа *ОД* (рис. 18-16) прямого света с открытым металлическим эмалированным отражателем. Рассчитан, как и большинство светильников, на две лампы.

Светильник типа *ОДР* отличается от светильника типа *ОД* наличием металлической защитной решетки, закрывающей лампы снизу.

Светильники типа *ОДО* отличаются от светильников типа *ОД* тем, что имеют в верхней части отражателя продольные отверстия, через которые около 15% светового потока направляется на потолок. Если светильник типа *ОДО* выполнен с металлической защитной решеткой, то он обозначается *ОДОР*. Наименьшая высота подвеса 3,5 *м*.

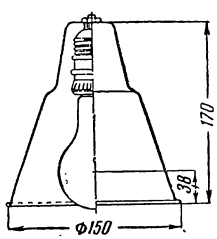


Рис. 18-15. Светильник «Альфа».

Светильники типа *ШЛД* и *ШОД* (рис. 18-17). Лампы снизу закрыты металлическими решетками, с боков — опаловыми стеклами, верхняя часть светильника имеет

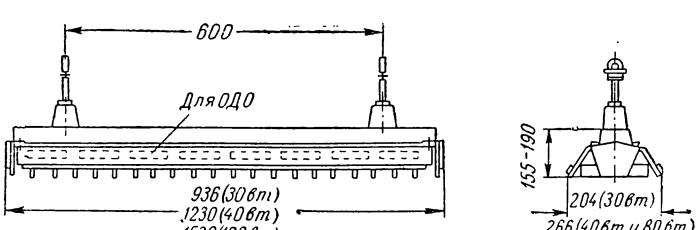


Рис. 18-16. Светильник для двух люминесцентных ламп типов ОД, ОДР, ОДО, ОДОР.

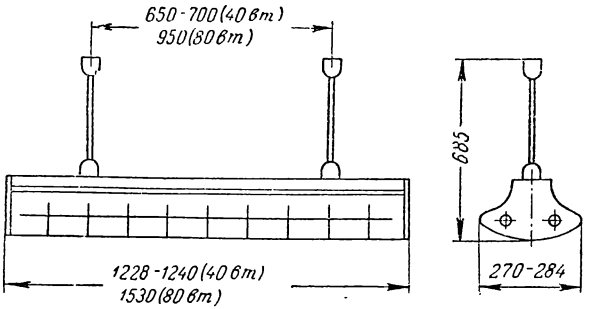


Рис. 18-17. Светильник для двух люминесцентных ламп типов ШЛД и ШОД.

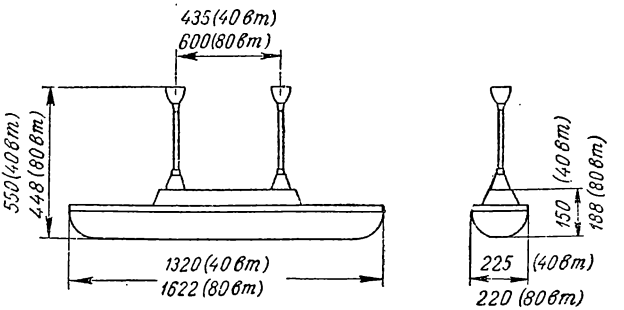


Рис. 18-18. Светильник для двух люминесцентных ламп типа ПВЛ.

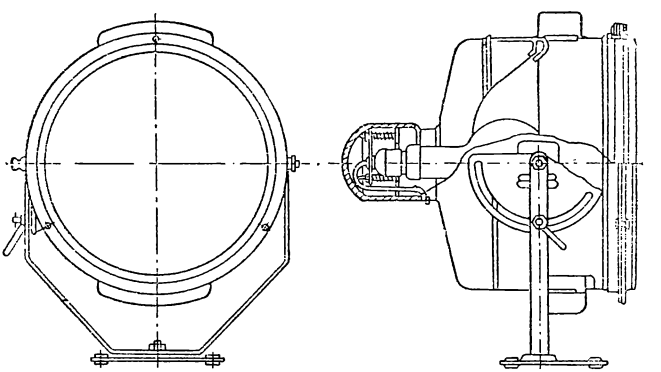


Рис. 18-19. Прожектор типа ПЗС-45.

щели, через которые часть светового потока (более 15%) направляется на потолок.

Светильники типа *ПВЛ* (рис. 18-18) — светильник рассеянного света. Он имеет рассеиватель из органического стекла, плотно прилегающий к корпусу светильника и защищающий его от пыли и влаги.

Для освещения площадей, железнодорожных путей и станции, строительных площадок, открытых складов и трансформаторных подстанций и т. д. применяются прожекторы. На рис. 18-19 показан прожектор типа ПЗС-45. При помощи оптической системы световой поток лампы сосредоточивается в небольшой телесный угол, чем достигается большая сила света. Прожектор ПЗС-45 дает силу света до 160 000 *св* при лампе мощностью 1 000 *вт*.

18-4. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Расчет электрического освещения имеет целью определение суммарной мощности и мощности каждой лампы осветительной установки.

При расчете необходимо пользоваться нормами наименьшей допустимой освещенности (табл. 18-3 и 18-4).

Для обеспечения достаточной освещенности следует брать несколько светильников, размещая их друг от друга на расстоянии L, равном или меньшем удвоенной высоты подвеса светильника $H_р$ над рабочей поверхностью, таким образом:

$$L \leqslant 2H_р.$$

Размещать светильники предпочтительней по вершинам квадратов. При наличии рабочих мест у стены расстояние от стены до первого ряда светильников берется равным 0,25 расстояния между светильниками. При отсутствии у стены рабочих мест указанное расстояние увеличивается вдвое.

Светильники подвешиваются с таким расчетом, чтобы цеховое оборудование не мешало освещению рабочих мест.

Расчет освещения закрытых помещений обычно выполняется методом коэффициента использования. При этом расчете заданная освещенность на рабочей поверхности получается от прямого светового потока лампы и от потока, отраженного от потолка и стен.

Таблица 18-3

Нормы освещенности на рабочих поверхностях в производственных помещениях

Характер работы или название помещения	Размер объекта различения, *мм*	Контраст объекта с фоном	Фон	Наименьшая освещенность, *лк*			
				при люминесцентных лампах		при лампах накаливания	
				комбинированное освещение	одно общее освещение	комбинированное освещение	одно общее освещение
Особо точная	0,1 и менее	Малый	Темный	3 000	750	1 500	300
		»	Светлый	2 000	750	1 000	300
		Средний	»	1 500	500	750	300
		Большой	»	750	300	400	150
Высокая точность	Более 0,1 до 0,3	Малый	Темный	2 000	750	1 000	300
		»	Светлый	1 000	400	500	150
		Средний	»	750	200	400	100
		Большой	»	500	150	300	75
Точная	Более 0,3 до 1	Малый	Темный	1 000	300	500	150
		»	Светлый	750	200	400	100
		Средний	»	500	150	300	75
		Большой	»	400	150	200	50
Малая	Более 1 до 10	Малый	Темный	150	150	150	50
		»	Светлый	150	150	150	50
		Средний	»	100	100	100	30
		Большой	»	100	100	100	30
Грубая	Более 10	Независимо		100	100	100	30
Требующая общего наблюдения за ходом производственного процесса без выделения отдельных деталей		Независимо		75	75	—	20
Работы с самосветящимися предметами или материалами		Независимо		150	150	—	50

Таблица 18-4

Нормы освещенности для некоторых помещений

Наименование помещения или производственное оборудование	Наименьшая освещаемость, *лк*			
	при люминесцентных лампах		при лампах накаливания	
	комбинированное освещение	одно общее освещение	комбинированное освещение	одно общее освещение
1. Цех металлообработки:				
а) станочное оборудование	500	50	—	—
б) кузнечный, сварочный, термический	1 000	50	—	—
2. Котельные:				
а) котельный зал	—	30	—	—
б) фронт котлов	150	—	—	—
в) измерительные приборы	300	—	—	—
3. Гаражи:				
а) ремонтный зал, профилакторий	—	50	—	—
б) моечное отделение	—	20	—	—
4. Электростанции и подстанции:				
а) щиты	—	200—100	—	—
б) камеры трансформаторов	—	30	—	—
5. Общежития и интернаты	—	100	—	50
6. Кабинеты, комнаты для конторских занятий	—	200	—	75
7. Машинописные, машиносчетные бюро, чертежные	—	300	—	150
8. Аудитории, классы, лаборатории	—	300	—	150
9. Залы, столовые, буфеты	—	200	—	75
10. Лестницы и коридоры	—	75—50	—	20—10
11. Санузлы	—	75	—	30

Для выполнения расчета необходимо:

1. Определить площадь помещения $S = a \cdot b$, выбрать тип светильника, высоту подвеса $H_р$ светильника над рабочей освещаемой поверхностью, число светильников n и их размещение.

2. Определить среднюю освещенность $E_{ср}$, которая должна быть такой, чтобы в наиболее слабо освещенных местах освещенность $E_{мин}$ была равна или несколько превышала рекомендованную нормами (табл. 18-3 и 18-4).

Отношение минимальной освещенности к средней называется п о п р а в о ч н ы м к о э ф ф и ц и е н т о м

$$Z = \frac{E_{мин}}{E_{ср}}.$$

Поправочный коэффициент для светильников имеет значения: 1) «Глубокоизлучатель» эмалированный — 0,9; 2) «Универсаль» с затенителем — 0,85; 3) «Универсаль» без затенителя — 0,82; 4) «Шар молочный» — 0,87; 5) «Люцетта» — 0,8.

Таким образом, средняя освещенность

$$E_{ср} = \frac{E_{мин}}{Z}.$$

3. Коэффициент запаса $k_з$ обеспечивает увеличение освещенности, необходимое для того, чтобы загрязнение светильников потолка и стен помещения при эксплуатации установки не вызывало при этом снижения освещенности, ниже допустимой. Коэффициент запаса для помещений с большой запыленностью принимается равным 1,5, а при малой запыленности —1,3.

4. Определить показатель помещения, если длина помещения a, а ширина $в$:

$$\varphi = \frac{ab}{H_р (a + b)}.$$

5. Определить коэффициент использования $k_и$ установки, представляющий собой отношение светового потока $F_{пад}$, падающего на освещаемую поверхность, к световому потоку ламп $F_л$. Этот коэффициент зависит от типа светильника, коэффициента отражения потолка и стен и показателя помещения.

Значения коэффициента использования находятся по табл. 18-5.

Таблица 18-5

Таблица для определения коэффициента использования

Светильник	«Глубокоизлучатель» эмалированный $Г_э$			«Универсаль» без затенителя $У$			«Универсаль» с затенителем $У_м$			Шар опалового стекла $Ш_о$				«Люцетта» $Л_ц$			
$\rho_{пот}$, %	30	50	70	30	50	70	30	50	70	30	50	50	70	30	50	50	70
$\rho_{ст}$, %	10	30	50	10	30	50	10	30	50	30	30	50	50	30	30	50	50
φ	Коэффициент использования, %																
0,6	24	27	31	27	30	34	19	22	26	10	12	16	17	19	21	25	27
0,8	32	34	37	35	38	41	26	28	32	14	16	20	21	25	26	31	33
1,0	36	38	40	40	42	45	30	32	35	17	19	22	24	29	31	34	37
1,25	39	41	43	44	46	48	33	35	37	19	21	24	28	31	34	38	41
1,5	41	43	46	46	48	51	35	36	40	21	23	27	30	34	37	41	44
2,0	44	46	49	50	52	55	39	40	43	24	27	30	34	38	41	45	48
2,5	48	49	52	54	55	59	42	44	46	27	29	33	37	41	45	48	52
3,0	49	51	53	55	57	60	43	45	47	28	31	35	39	44	47	51	54
4,0	51	52	55	57	59	62	45	47	49	31	35	38	43	46	50	54	59
5,0	52	54	57	58	60	63	46	48	51	32	37	40	46	48	52	56	61

Светильник	ОД			ОДР			ОДОР		
$\rho_{пот}$, %	30	50	70	30	50	70	30	50	70
$\rho_{ст}$, %	10	30	50	10	30	50	10	30	50
φ	Коэффициент использования, %								
0,6	30	33	37	27	30	34	23	27	32
0,8	39	41	45	35	37	41	30	33	38
1,0	44	46	49	40	42	45	34	38	42
1,25	48	50	53	43	45	48	38	41	45
1,5	50	52	56	45	48	51	40	43	47
2,0	55	57	60	50	52	54	43	47	52
2,5	59	61	64	53	55	58	47	50	56
3,0	60	62	66	54	56	60	48	52	58
4,0	63	65	68	57	58	62	50	54	60
5,0	64	66	70	58	60	63	51	56	62

6. Световой поток одной лампы определяется по формуле

$$F_л = \frac{E_{ср} S k_з}{k_и n},$$

где n — число ламп.

7. Мощность лампы определяется по полученному значению светового потока, пользуясь табл. 18-1 и 18-2.

Пример 18-1. Рассчитать освещение производственного помещения шириной $a = 16$ *м*, длиной $b = 20$ *м* (рис. 18-20) со светлым потолком и несветлыми стенами. Помещение предназначено для работы с деталями от 1 до 10 *мм* на светлом фоне.

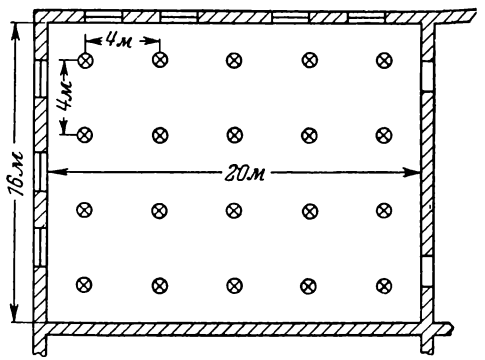


Рис. 18-20. Размещение светильников.

Для освещения выбираем светильник «Универсаль» без затенителя с высотой подвеса над рабочей освещаемой поверхностью $H_р = 3$ *м*. Рабочая поверхность находится на высоте 0,75 *м* от пола помещения.

Размещаем светильники по вершинам квадрата со стороной $L = 4$ *м* $< 2 H_р$. Светильники размещаем на расстоянии $0{,}5 L = 2{,}0$ *м* от стен, так как рабочих мест у стен нет. Число светильников $n = 20$.

Освещаемая площадь $S = ab = 16 \cdot 20 = 320$ *м*^{2}. По нормам (табл. 18-3) выбираем наименьшую освещаемость $E_{мин} = 50$ *лк*. Приняв значение поправочного коэффициента равным 0,82, найдем среднюю освещенность рабочей поверхности:

$$E_{ср} = \frac{E_{мин}}{Z} = \frac{50}{0{,}82} = 61 \text{ лк}.$$

Учитывая среднюю запыленность помещения, выбираем коэффициент запаса $k_з = 1{,}4$.

Показатель помещения

$$\varphi = \frac{ab}{H_р (a + b)} = \frac{16 \cdot 20}{3 (16 + 20)} = \frac{320}{108} = 2{,}95.$$

При светлых потолках $\rho_{пот} = 50\%$, при несветлых стенах помещения $\rho_{ст} = 30\%$ по табл. 18-5 для светильника «Универсаль» без затенителя при показателе помещения $\varphi = 2{,}95$ находим коэффициент использования $k_и = 57\%$.

Световой поток одной лампы

$$F_л = \frac{E_{ср} S k_з}{k_и n} = \frac{61 \cdot 320 \cdot 1{,}4}{0{,}57 \cdot 20} \approx 2\,400 \text{ } лм.$$

При напряжении в сети $U = 220$ *в*, по таблице 18-1 находим лампу с ближайшим по величине световым потолком $F_л = 2\,660$ *лм* мощностью 200 *вт*.

При этой лампе средняя освещенность

$$E_{ср} = 61 \frac{2\,660}{2\,400} \approx 67 \text{ } лк.$$

Мощность осветительной установки

$$P = P_л n = 200 \cdot 20 = 4\,000 \text{ } вт = 4{,}0 \text{ } квт.$$

Наиболее простым методом расчета электрического освещения является метод удельной мощности.

Удельной мощностью называется мощность осветительной установки какого-либо помещения, отнесенная к единице площади пола помещения, т. е.

$$P = \frac{P_л n}{S}.$$

В табл. 18-6 в зависимости от типа светильника, высоты его подвеса, площади пола помещения и требуемой освещенности даны значения удельной мощности.

Найдя по табл. 18-6 значение удельной мощности и умножив ее на площадь пола помещения, определим необходимую суммарную мощность ламп. Разделив найденную мощность на число ламп, получим мощность одной лампы

$$P_л = \frac{PS}{n}.$$

Наряду с рабочим освещением должно быть аварийное освещение. Для помещений, в которых перерыв работы недопустим (электростанции, литейные и мартеновские цехи), должно быть предусмотрено аварийное освещение для продолжения работы. Оно должно иметь независимый источник питания, обеспечивающий освещенность не менее 10% нормальной.

В производственных помещениях с числом рабочих более 50, в которых временное прекращение работы возможно

Таблица 18-6

Нормы удельной мощности общего равномерного освещения, *вт/м²*

Тип светильника	Высота подвеса, *м*	Освещенность, *лк*	Площадь, *м²*			
			10—25	25—50	50—150	Свыше 150
«Универсаль» и «Глубокоизлучатель» эмалированный	3—4	10	6,0	4,6	3,6	3,2
		20	10,3	7,7	5,9	5,2
		30	13,6	11	8	7
		50	21	16	12	11
		75	29	22	17	15
	4—6	10	7,4	5,1	3,5	2,6
		20	13	8,7	6	4,7
		30	18	12	8,7	6,6
		50	28	19	13	10
		75	40	27	19	15
Люцетта	2—4	10	5,8	4,6	3,7	3,2
		20	10	8	6,5	5,7
		30	14	11	8,7	7,3
		50	21	16	13	11
		75	29	21	18	15
		100	39	28	24	20
Шар молочного стекла	2—4	10	8,5	6,3	5	4
		20	15	11	8,6	6,9
		30	21	16	12	9,7
		50	32	25	20	16
		75	48	38	30	24
		100	64	50	40	32
Светильники типа *ОД* и *ОДР* с лампами *БС*	3—4	75	10	6,5	5,5	4,5
		100	13	9	8	6,5
		150	19	13	11,5	9,5
		200	25	18	15,5	12,5
		300	38	26	23	19
		500	63	44	38	31
	4—6	75	14,5	9	6,5	5
		100	19	12	9	7
		150	29	18,5	13,5	10
		200	38	24,5	18	13,5
		300	58	36,5	26,5	20,5
		500	95	61	44	33,5

и в которых отсутствие света может привести к травматизму, а также в проходах и лестничных клетках должно быть аварийное освещение для эвакуации людей.

Светильники аварийного освещения могут работать одновременно с рабочими или включаться автоматически при выключении рабочего освещения.

Пример 18-2. Рассчитать освещение для помещения, заданного в примере 18-1, методом удельной мощности.

Выбираем светильник «Универсаль» с высотой подвеса $H_р = 3$ *м*. Среднюю освещенность $E_{ср} = 61$ *лк*, и, зная площадь помещения $S = 320$ *м*, находим по табл. 18-6 требующуюся удельную мощность 13 *вт/м*^{2}.

Требуемая мощность всех ламп

$$P = 13 \cdot 320 = 4\,160 \text{ вт}.$$

При числе ламп $n = 20$ получим мощность одной лампы

$$P_л = \frac{4\,160}{20} = 208 \text{ вт}.$$

Выбираем по табл. 18-1 наиболее близкую по мощности лампу с мощностью $P'_п = 200$ *вт*, тогда мощность всей осветительной установки

$$P' = P'_л n = 200 \cdot 20 = 4\,000 \text{ вт}.$$

ГЛАВА ДЕВЯТНАДЦАТАЯ

ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

19-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ О ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Электрическая энергия вырабатывается на электрических станциях за счет преобразования какого-либо другого вида энергии.

В СССР большая часть электрической энергии вырабатывается на мощных тепловых государственных районных электростанциях — ГРЭС и на крупнейших в мире гидроэлектростанциях — ГЭС. Например, Волжская гидростанция имени В. И. Ленина мощностью 2,3 млн. *квт*, Волжская ГЭС имени XXII съезда КПСС мощностью 2,6 млн. *квт*, Братская — 4,5 млн. *квт* и др.

ГРЭС и ГЭС находятся в районах расположения природных запасов энергии — торф, бурый уголь, падающая вода,

в большинстве случаев удаленных от потребителей электроэнергии.

Значительно меньшая доля вырабатываемой энергии приходится на станции второй группы — станции местного значения. Это станции, расположенные в непосредственной близости к потребителям; к ним относятся так называемые теплоэлектроцентрали — ТЭЦ, вырабатывающие электрическую и тепловую энергию, станции промышленных предприятий, городские, сельскохозяйственные и др. Они имеют значительно меньшие мощности от десятка тысяч киловатт до сотен и десятков киловатт.

Все районные электростанции, ТЭЦ и большая часть станций местного значения являются станциями трехфазного тока.

Потребность в постоянном токе некоторых производств, например электрохимии, электрометаллургии и электрифицированного транспорта, удовлетворяется путем преобразования трехфазного тока в постоянный ток на преобразовательных подстанциях, оборудованных выпрямителями.

Станции местного значения небольшой мощности в большинстве случаев работают самостоятельно без связи с другими станциями.

Большинство же станций объединяются для общей совместной (параллельной) работы. Такие объединения принято называть энергетическими системами — энергосистемами.

Энергосистема имеет более благоприятный график работы, т. е. имеет меньшие колебания нагрузки, чем отдельные станции. При объединенной работе станций возможно более рационально распределить нагрузку между станциями и значительно уменьшить мощность резервных агрегатов. Энергосистема позволяет снизить себестоимость электроэнергии и сократить расходы топлива за счет наиболее полного использования ГЭС. Объединение электростанции в энергосистемы является характерной особенностью развития советской энергетики.

Энергетические системы соседних районов, развиваясь, также объединяются. Они соединяются высоковольтными линиями электропередачи, образуя мощные объединенные энергетические системы. Так, например, объединение Московской, Горьковской, Ивановской и Ярославской энергосистем привело к созданию объединенной энергосистемы Центрального района.

На современном этапе развития происходит дальнейшее объединение энергосистем при помощи единой высоковольтной сети (ЕВС) в Единую энергетическую систему (ЕЭС) страны.

После ввода в эксплуатацию Волжских ГЭС имени В. И. Ленина и имени XXII съезда КПСС и первых звеньев ЕВС электропередач, которые связали эти волжские электростанции — гиганты с энергосистемами центра, ЦЧО, Юга и Урала, создана первая очередь ЕЭС европейской части СССР.

В текущем семилетии развертываются также работы по созданию ЕЭС Центральной Сибири, от Иркутска до Новосибирска, решающая роль в которой принадлежит Братской и Красноярской ГЭС.

В дальнейшем, к 1970 г., ЕЭС Центральной Сибири будет объединена с ЕЭС европейской части Советского Союза и таким образом будет образована ЕЭС СССР. Создание и развитие ЕЭС обеспечит наилучшее сочетание и использование различных видов энергетических ресурсов и энергетического оборудования, наилучшую маневренность и экономичность энергетической базы народного хозяйства Советского Союза.

Промышленные приемники электроэнергии (двигатели) небольшой мощности изготовляются на номинальное напряжение 220—380—660 *в*, а при мощности от 70 *квт* и выше на напряжение 3—6—10 *кв*.

Большинство бытовых приемников изготовляется на номинальное напряжение 110—127—220 *в*.

Таким образом, напряжения 220—380—660 *в* являются основными для сетей низкого напряжения промышленных предприятий, городов и колхозов.

Станции местного значения небольшой мощности, расположенные вблизи потребителей работают при том же напряжении, что и потребители (220—380—660 *в*), т. е. передача энергии происходит без трансформации ее.

Станции местного значения повышенной мощности работают при напряжениях 3—6—10 *кв*. Часть энергии этих станций непосредственно направляется к высоковольтным приемникам, имеющим то же номинальное напряжение. Другая часть энергии передается в район потребления по сети с напряжением 127, 220, 380 или 660 *в*.

При передаче энергии ГРЭС и частично ТЭЦ энергия от генераторов с номинальным напряжением 10—15 *кв* посту-

пает на трансформаторные повысительные подстанции. После повышения напряжения на подстанции до 35—110—

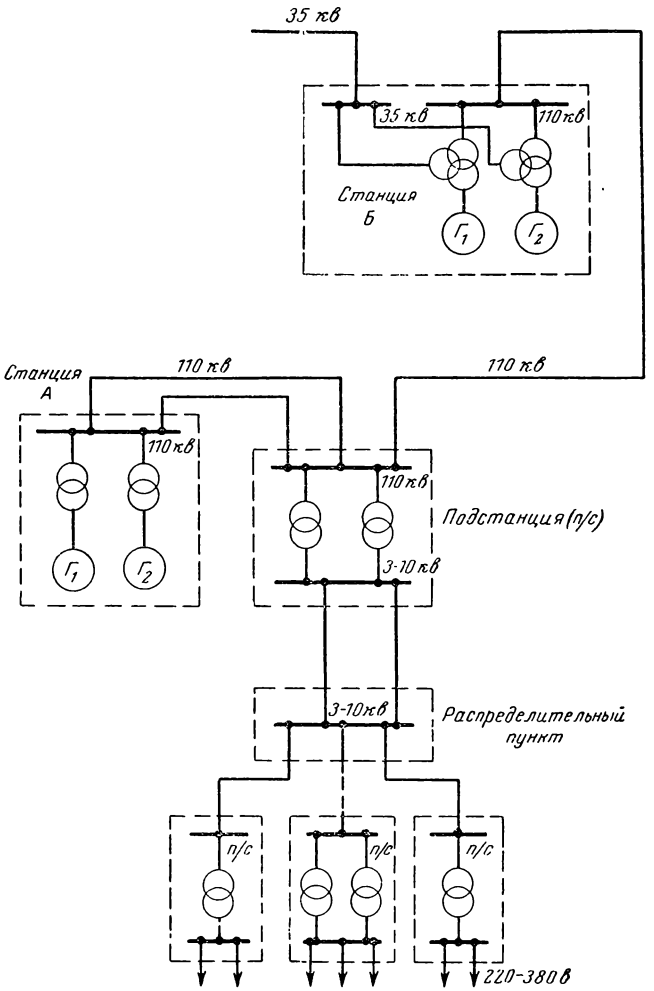


Рис. 19-1. Схема передачи и распределения электроэнергии.

220—330—500 *кв* энергия по высоковольтной линии передачи направляется в район потребления на понизительные подстанции 35—110—220—330—500—*кв*/6—10 *кв*. Затем энергия по сети с напряжением 6—10 *кв* частично напра-

вляется к высоковольтным приемникам, частично на понизительные подстанции 6—10 *кв*/220—380 *в*, откуда по сети с напряжением 220 и 380 *в* подводится к потребителю.

На рис. 19-1 показана одна из возможных схем передачи электроэнергии. Схема дана однолинейной, т. е. три фазы линии передачи изображены одной линией.

Напряжения линий передачи выбираются с таким расчетом, чтобы передача энергии происходила с малыми потерями при наименьшей стоимости передачи и наименьшей затрате проводниковых материалов.

Мощность, передаваемая по линии трехфазного тока (см. § 6-4 и 6-5):

$$P = \sqrt{3}\, UI \cos \varphi.$$

Мощность потерь в проводах

$$\Delta P = 3I^2 r = 3I^2 \rho \frac{l}{S}$$

или

$$\Delta P = 3 \frac{P^2}{3U^2 \cos^2 \varphi} \rho \frac{l}{S} = \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi} \rho \frac{l}{S}.$$

Если выражать мощность потерь в процентах передаваемой мощности, то

$$\Delta P\% = \frac{\Delta P}{P} 100\% = \frac{P}{U^2 \cos^2 \varphi} \rho \frac{l}{S} 100\%.$$

Из полученного выражения следует, что с увеличением мощности и расстояния, на которое передается электроэнергия, для уменьшения потерь энергии необходимо повышать напряжение.

Таблица 19-1

Зависимость напряжения от мощности и дальности передачи

Напряжение, *кв*	Передаваемая мощность, *квт*	Расстояние, *км*
0,22	50—100	До 0,2
0,38	100—175	» 0,35
6	2 000—3 000	» 5
10	3 000—5 000	» 10
35	5 000—10 000	» 25—40
110	10 000—50 000	» 50—150
220	100 000—150 000	» 200—300
300	150 000—1 000 000	» 300—400
500	1 000 000 и выше	Более 400

Практика выработала некоторые ориентировочные соотношения между напряжением, мощностью передачи и длиной линии передачи (табл. 19-1).

Эти цифры получены с учетом требований экономии проводникового материала и стоимости изоляции при увеличении напряжения линии передачи.

19-2. ЛИНИИ И СЕТИ

Электрическая энергия передается по системе проводов электрической линии, если система проводов не имеет разветвлений, или электрической сети, если она разветвленная.

Согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ) линии и сети подразделяются по напряжению на линии и сети напряжением до 1 000 *в* и линии и сети напряжением выше 1 000 *в*.

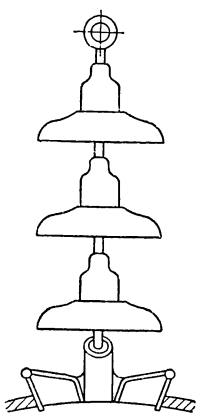


Рис. 19-2. Гирлянда подвесных изоляторов.

По своему назначению линии и сети делятся на питательные — предназначенные для передачи энергии от станции или подстанции к важнейшим узловым точкам сети — распределительным пунктам (РП), и распределительные сети, по которым электроэнергия от РП передается потребителям.

По своему устройству сети делятся на воздушные, кабельные или подземные и сети внутренней проводки.

Сооружение воздушных линий дешевле подземных, эксплуатация их удобнее и проще, так как повреждения легко обнаруживаются при осмотре, но они более опасны и менее надежны, чем подземные линии. Воздушные линии прокладываются преимущественно в открытых местностях и в местах с малой плотностью населения.

Воздушная линия состоит из трех основных частей: проводов, изоляторов и опор. Провода крепятся на изоляторах, которые в свою очередь крепятся на опорах.

Воздушные линии — линии электропередачи на напряжения 35—500 *кв*, имеют голые алюминиевые или сталеалюминиевые провода, гирлянды подвесных изоляторов

(рис. 19-2) и металлические или железобетонные опоры (рис. 19-3). Провода должны обладать достаточной механической прочностью. Расстояние между ними должно быть достаточно большим для того, чтобы даже при раскачивании их ветром была исключена возможность пробоя воздушного промежутка между проводами. По вершинам опор прокладываются стальные оцинкованные заземленные тросы, которые воспринимают на себя атмо-

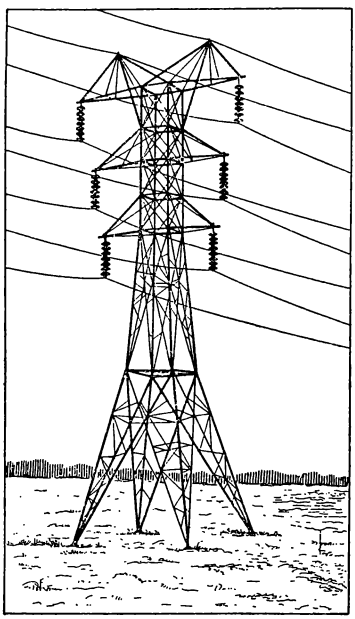


Рис. 19-3. Металлическая опора для двух трехфазных линий напряжением 110 *кв*.

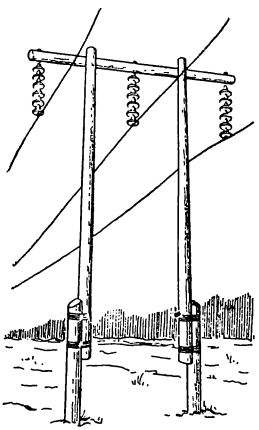


Рис. 19-4. Деревянная опора для трехфазной высоковольтной линии.

сферные электрические разряды и отводят электрические заряды в землю.

Для воздушных линий с напряжением 110 *кв* и ниже иногда применяют деревянные опоры (рис. 19-4). Для линий передач напряжением 35 *кв* и ниже часто вместо подвесных изоляторов применяют штыревые (рис. 19-5).

На рис. 19-6 показан ввод линии электропередачи в здание с применением проходного фарфорового изолятора.

Для воздушных линий с напряжением до 1 000 *в* применяют преимущественно алюминиевые провода. При боль-

ших расстояниях между опорами по условиям механической прочности алюминиевые провода заменяются сталеалюминиевыми (например, марки АС-16, имеющий шесть алюминиевых проволок диаметром 1,8 *мм* и одну стальную того же диаметра).

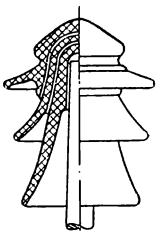


Рис. 19-5. Штыревой изолятор на напряжение 35 *кв*.

Провода монтируются на низковольтных фарфоровых изоляторах (тип ТФ, рис. 19-7), которые навертываются на штыревую часть крюка или штыря, при помощи которых изоляторы крепятся к опорам. Сечение алюминиевых проводов должно быть не менее 16 $мм^2$. Провода закрепляются на шейке изолятора (рис. 19-8, *а*), реже на головке (рис. 19-8, *б*) при помощи «вязки» — железной оцинкованной проволоки диаметром около 1 *мм*.

Для линии с напряжением до 1 000 *в* применяются деревянные опоры — столбы длиной около 9 *м*. Нижняя часть столба — нога может быть несоставной или составной. В последнем случае нижний конец опоры присоединяется к железобетонному или реже к деревянному «стулу» или

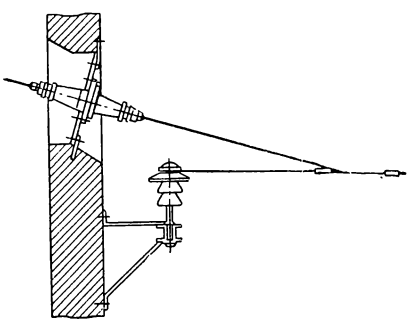


Рис. 19-6. Ввод линии в здание.

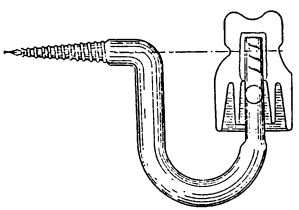


Рис. 19-7. Низковольтный фарфоровый изолятор типа ТФ, укрепленный на крюке.

«пасынку» (рис. 19-9). Соединение ноги со стулом выполняется при помощи бандажа, состоящего из 6—8 витков оцинкованной стальной проволоки диаметром около 4 *мм*. Расстояние между опорами составляет 30—80 *м*. Расстояние провода от земли должно быть не менее 5 *м*, расстояние между проводами при напряжении до 250 *в* не меньше 30 *см*.

Подземные линии применяются в городах, местностях с большой плотностью населения, на территориях промыш-

ленных предприятий и для внутризаводских сетей. Для подземных линий применяются к а б е л и. Кабели состоят

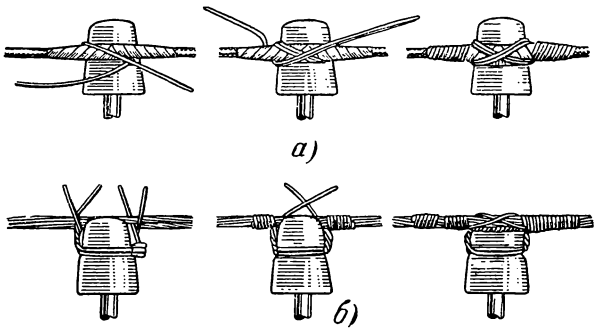


Рис. 19-8. Крепление проводов.
а — на шейке изоляторов; *б* — на головке.

из токоведущих жил, изоляции, герметической оболочки и наружного защитного покрова. По числу жил кабели изготовляются одно-, двух-, трех- и четырехжильными. Жилы кабеля выполняются из меди или алюминия и имеют круглое или секторообразное сечение. Кабели изготовляются с сечением жил от 1 до 240 *мм*² (1, 1,5, 2,5, 4, 6, 10, 16, 25 и т. д.) для напряжений до 1 000 *в* и для 3, 6, 10 и 35 *кв*.

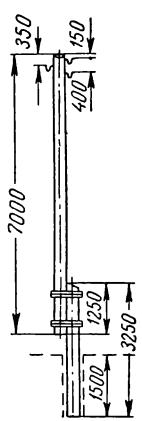


Рис. 19-9. Деревянная опора с «пасынком» для линии напряжением до 1 000 *в*.

Изолирующая оболочка кабеля предназначена для изоляции между жилами и между жилами и землей. Изоляционным материалом является кабельная бумага, пропитанная маслоканифольным составом, резина и полиэтилен. Герметическая оболочка из свинца, алюминия, пластиката или резины предназначена для защиты кабеля от проникновения влаги. Для защиты от механических повреждений кабели имеют броню из двух стальных лент или оцинкованной проволоки. Броня или оболочка кабеля покрываются джутом, пропитанным битумной массой, для защиты от химических действий. Марки кабелей содержат указания на материал жил, защитной оболочки и тип защитного покрова. Алюминиевая жила обозначается буквой *А*, стоящей на

первом месте. Медная жила не обозначается. Материал защитной оболочки указывается буквами: *С* — свинец; *А* — алюминий. Буква *Б* обозначает наличие брони из стальных лент. Например, марка кабеля *ААБ* обозначает: алюминиевая жила, алюминиевая оболочка и стальная броня с джутово-битумным покрытием. Марка кабеля *АСБ* — алюминиевая жила, свинцовая оболочка и стальная броня, покрытая джутом и битумом. Кабель марки *АСБГ* отличается от предыдущего отсутствием джутового и битумного покрытия поверх стальной брони (*Г* — голый).

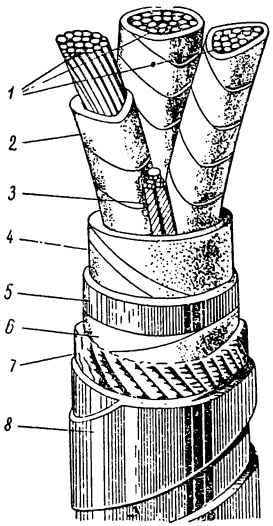


Рис. 19-10. Трехжильный кабель марки СБГ.

1 — жилы кабеля; *2* — бумажная изоляция жил; *3* — заполнители; *4* — поясная бумажная изоляция; *5* — свинцовая оболочка; *6* — бумажно-битумное покрытие; *7* — кабельная пряжа; *8* — броня из двух стальных лент.

На рис. 19-10 показано устройство трехжильного кабеля с медными жилами марки *СБГ*, предназначенного для прокладки в кабельных туннелях и каналах внутри здания.

Кабели укладываются в траншеях шириной 25—50 *см*, глубиной 70—80 *см* от поверхности земли. В больших городах кабели часто прокладываются в подземных коридорах — коллекторах.

Для соединения концов кабелей применяют свинцовые или чугунные кабельные муфты (рис. 19-11), заливаемые кабельной массой. Применяется также безмуфтовое соединение кабелей.

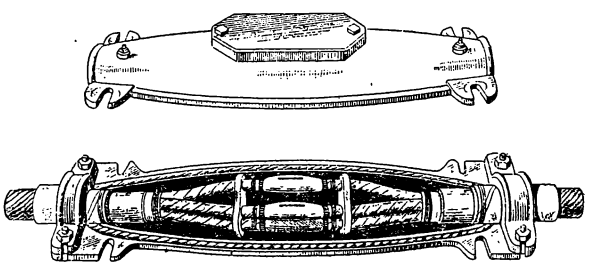


Рис. 19-11. Чугунная муфта для соединения концов кабелей.

Концы кабелей, присоединяемые к зажимам электрических аппаратов, машин, трансформаторов, оконцовы-

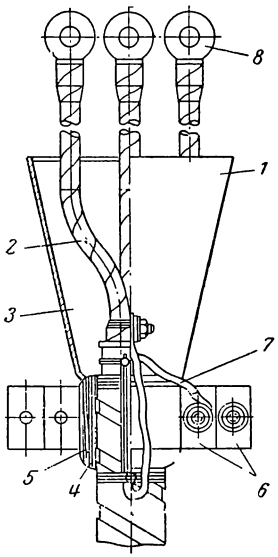


Рис. 19-12. Концевая заделка трехжильного кабеля в стальной воронке.

1 — стальная воронка; *2* — изолированная жила; *3* — заливка битумной массой; *4* — подмотка просмоленной лентой; *5* — бандаж из просмоленной ленты; *6* — полухомут для крепления; *7* — заземляющий провод; *8* — наконечник.

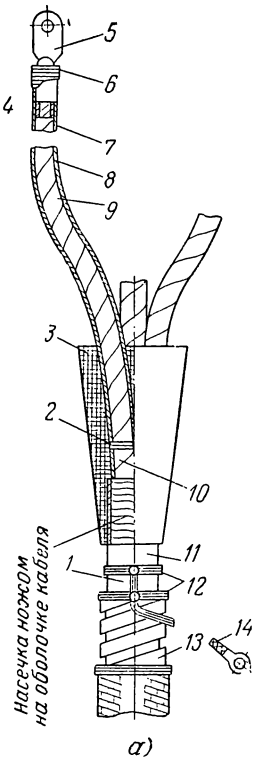


Рис. 19-13. Концевая заделка кабеля с применением эпоксидного компаунда.

а — общий вид; *б* — ступенчатая разделка; *1* — припаянный заземляющий проводник; *2* — бандаж из хлопчатобумажной пряжи; *3* — эпоксидный компаунд; *4* — подмотка киперной ленты; *5* — наконечник; *6* — бандаж из шпагата; *7* — жила кабеля; *8* — подмотка киперной ленты с покрытием компаундом; *9* — фазная изоляция; *10* — поясная изоляция; *11* — свинцовая оболочка кабеля; *12* — проволочный бандаж; *13* — броня кабеля; *14* — оконцованный заземляющий проводник.

вают, т. е. заключают в специальные стальные концевые муфты, стальные кабельные воронки (рис. 19-12), заполняемые кабельной массой, а также применяют и «сухие заделки». Заделки из искусственных смол, напри-

мер из эпоксидного компаунда (рис. 19-13), отличаются от оконцеваний стальными воронками высокой герметичностью, электрической прочностью и простотой монтажа. Они применяются для кабелей напряжением до 10 *кв*.

19-3. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ЦЕХОВ

Промышленные предприятия в большинстве случаев получают электрическую энергию от энергосистемы.

В зависимости от мощности предприятия и ряда условий электрическая энергия подается потребителю под напряжением: 1) 35—110 *кв*; 2) 3—6—10 *кв* или 3) 380/220 *в*.

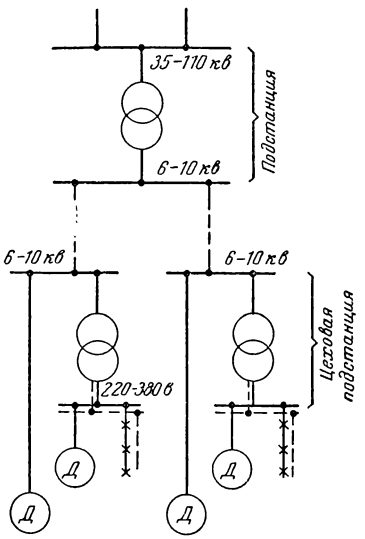


Рис. 19-14. Схема распределения энергии крупного промышленного предприятия.

В первом случае напряжение подается на понизительную подстанцию предприятия, где оно и трансформируется с 35—110 *кв* до 6—10 *кв* (рис. 19-14). При этом напряжении электрическая энергия обычно по кабельным линиям передается по территории предприятия к цеховым подстанциям. К шинам этих подстанций 6—10 *кв* присоединяются кабельные линии для питания высоковольтных электродвигателей и трансформаторы, понижающие напряжение до 380/220 *в*, по которым энергия и распределяется между низковольтными приемниками энергии цеха.

Во втором случае энергия поступает на главный распределительный пункт (ГРП) предприятия, предназначенный для приема и распределения энергии (рис. 19-15). Энергия к ГРП подводится по одной-двум кабельным (реже воздушным) линиям напряжением 3—6—10 *кв*, а число отходящих от него линий того же напря-

жения, по которым энергия подается к цеховым трансформаторным подстанциям, обычно значительно больше.

На более мелких предприятиях, не имеющих высоковольтных приемников энергии, электрическая энергия из сети энергосистемы подводится к заводской трансформаторной подстанции с напряжением 6—10 *кв*/380—220 *в* и под этим последним напряжением передается к цеховым распределительным пунктам.

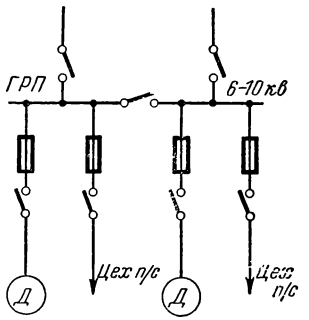


Рис. 19-15. Схема распределения электроэнергии через распределительный пункт предприятия.

В третьем случае на предприятия с малой установленной мощностью энергия из энергосистемы поступает при напряжении 380/220 *в* на низковольтный распределительный пункт предприятия, откуда и распределяется по отдельным цехам.

Распределение энергии в промышленных предприятиях между ГРП или трансформаторной подстанцией и цеховыми распределительными пунктами производится по радиальной (рис. 19-16) или магистральной схеме (рис. 19-17).

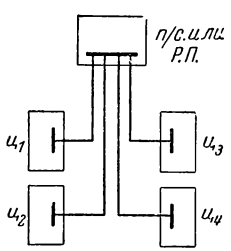


Рис. 19-16. Радиальная схема распределения электроэнергии по цехам.

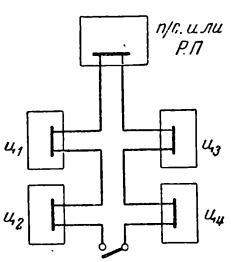


Рис. 19-17. Магистральная схема распределения электроэнергии по цехам.

К недостаткам радиальной схемы относятся высокая стоимость и меньшая надежность работы, так как при аварии радиальной линии прекращается подача электроэнергии по этой линии. Из достоинств следует отметить простоту эксплуатации, защиты и автоматизации.

Достоинством магистральной схемы является дешевизна и большая надежность снабжения электроэнергией, если магистраль замкнута (рис. 19-17) и, наоборот, меньшая надежность, если магистраль разомкнута.

На предприятиях с ответственными нагрузками с целью повышения надежности электроснабжения обычно применяют магистральные схемы с питанием их с двух сторон от разных трансформаторов (подстанций).

Для уменьшения колебаний напряжения на светильниках, связанных с пуском электродвигателей, в большинстве случаев применяют разделение линии и сетей на осветительные и силовые.

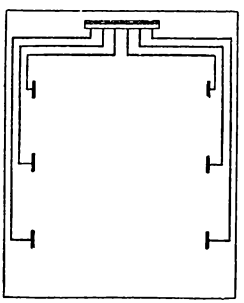


Рис. 19-18. Радиальная схема.

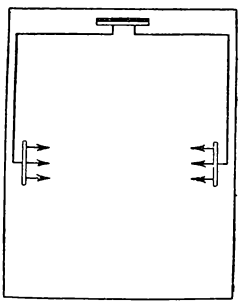


Рис. 19-19. Радиально-ступенчатая схема.

При напряжении в установке 380/220 *в* двигатели присоединяются к линейным проводам (380 *в*), а лампы включаются между нейтральным (нулевым) проводом и линейными проводами (220 *в*).

Внутри цеха, при небольшом числе мощных двигателей, применяется радиальная схема питания (рис. 19-18), при которой от цехового щита (РП) к каждому двигателю идет самостоятельная линия. При большом числе мелких двигателей от цехового РП идут линии к участковым РП, к которым присоединяются линии для питания отдельных приемников (рис. 19-19).

Широкое применение в цехах получила простая и дешевая магистральная схема, состоящая из голых шин — ш и н о п р о в о д (токопровод), вдоль которого в нужных точках непосредственно присоединяются приемники энергии.

19-4. ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ПОДСТАНЦИИ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Распределительные устройства (РУ) и трансформаторные подстанции (ТП) с напряжением 35—110 *кв* выполняются о т к р ы т ы м и, все электрооборудование их размещается на открытом воздухе. Только при наличии в воздухе веществ, вредно действующих на электрооборудование, РУ и подстанции на указанные напряжения выполняются з а к р ы т ы м и, т. е. размещаются в зданиях. Открытые устройства дешевле закрытых, скорее сооружаются и требуют несравненно меньше строительных материалов.

Широкое применение получили комплектные распределительные устройства (КРУ) и комплектные трансформаторные подстанции (КТП).

К о м п л е к т н ы м и называются распределительные устройства и трансформаторные подстанции, состоящие из отдельных металлических шкафов с смонтированным в них электрооборудованием. Изготовление шкафов и монтаж оборудования в них производится на заводах. Шкафы выпускаются определенной номенклатуры. Оборудование и схемы их выбраны так, чтобы из нескольких шкафов можно было собрать распределительное устройство или подстанцию. Шкафы изготовляются как на напряжение до 500 *в*, так и на напряжение выше 500 *в*. Применение КРУ и КТП ускоряет и удешевляет сооружение электроустановки.

На рис. 19-20 дано устройство открытой трансформаторной подстанции напряжением 35/6—10 *кв* промышленного предприятия.

Трансформатор, например, мощностью 3 200 *ква* через предохранители и разъединители присоединен к воздушной линии 35 *кв*. Для защиты от перенапряжений применен вентильный разрядник. Вторичная обмотка трансформатора соединена с шинами КРУ для наружной установки.

Схема и разрез одного из шкафов КРУ дана на рис. 19-21. С шин *1* ток идет через шинный разъединитель *2*, масляный выключатель *3*, трансформатор тока *4*, линейный разъединитель *5* к кабельному или воздушному выводу и далее по линии на шины цеховой подстанции.

Главный распределительный пункт предприятия, на который электрическая энергия поступает от энергосистемы при напряжении 6—10 *кв*, размещается обычно в одноэтаж-

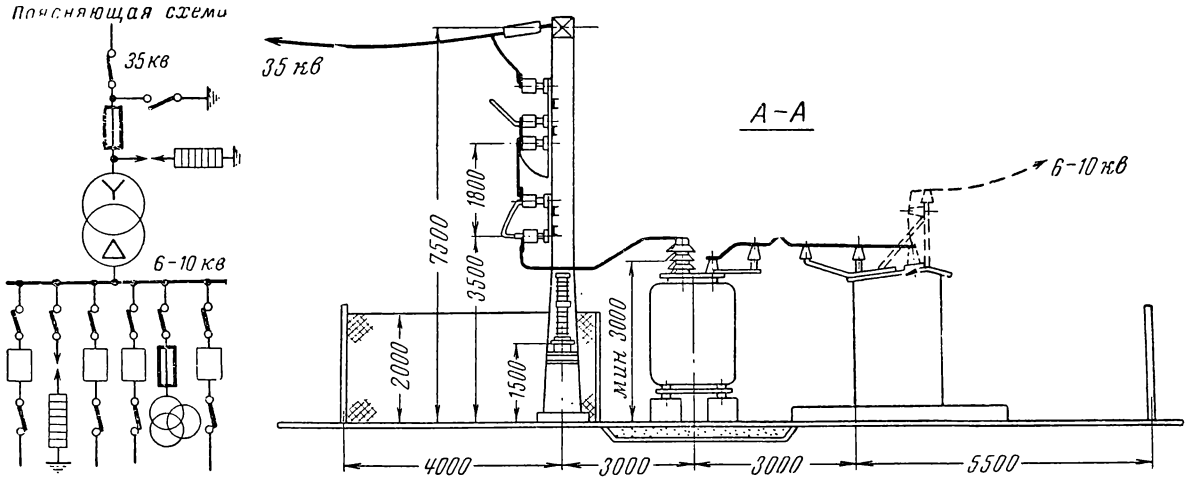


Рис. 19-20. Трансформаторная подстанция открытого типа 35/6—10 *кв*.

ном здании и оборудуется или шкафами КРУ, или камерами сборной конструкции.

Устройство одного из ГРП сборной конструкции показано на рис. 19-22. Главный распределительный пункт

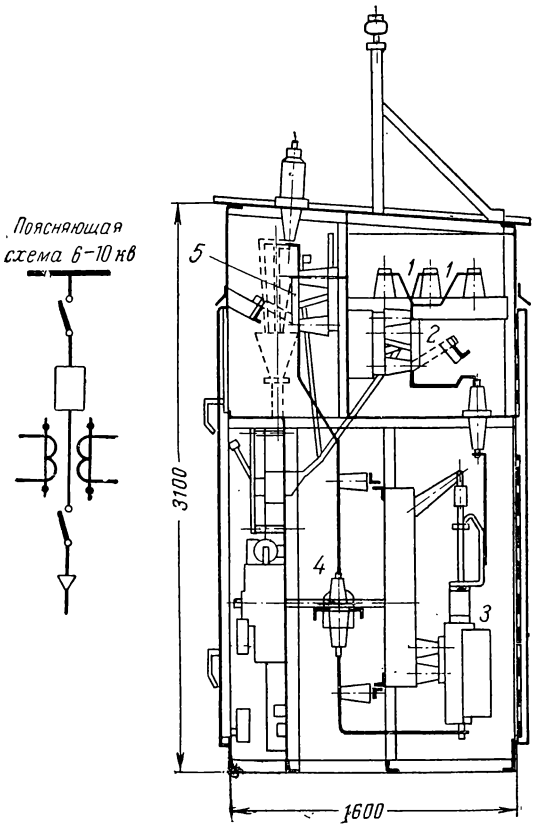


Рис. 19-21. Шкаф КРУ наружной установки с масляным выключателем и кабельным или воздушным выводом.

имеет однорядное расположение камер и коридор управления. На рисунке одноименная аппаратура обозначена теми же цифрами, что и на предыдущем рисунке.

Цеховые подстанции промышленных предприятий, так же как и ГРП, оборудуются или камерами сборной конструкции, или шкафами КТП.

Устройство одной из цеховых подстанций показано на рис. 19-23. Трансформатор с напряжением 6 *кв*/380—220 *в* и распределительный щит расположены в смежных помещениях.

Проемы в нижней части камеры (на рисунке не показаны) и вытяжная шахта в верхней обеспечивают охлажде-

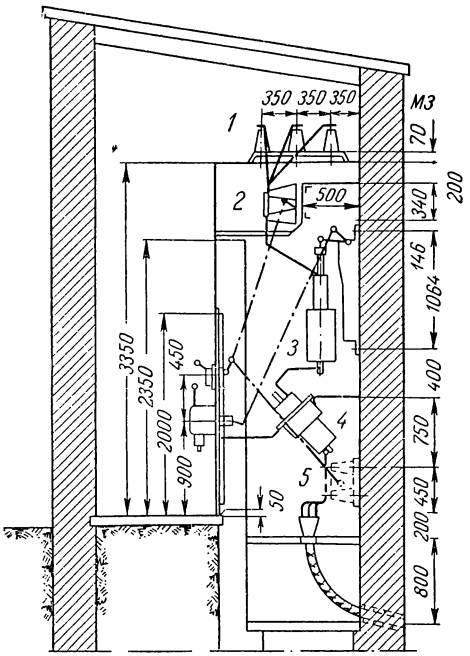


Рис. 19-22. Распределительное устройство 6—10 *кв*.

ние трансформатора. Энергия к трансформатору подводится через кабель *1*, разъединитель *2* с рычажным приводом *3*. Вторичные выводы трансформатора через разъединитель *4* с рычажным приводом *5* соединены с шинами распределительного щита. К шинам щита присоединены кабельные линии для освещения и шинопровод для питания электродвигателей. В каждой линии имеется предохранитель и рубильник, а в цепи шинопровода — воздушный автомат. Шинопровод через отверстие в стене проходит в соседнее помещение — цех.

Распределительные щиты низкого напряжения цеховых подстанций изготовляются с односторонним или двусторон-

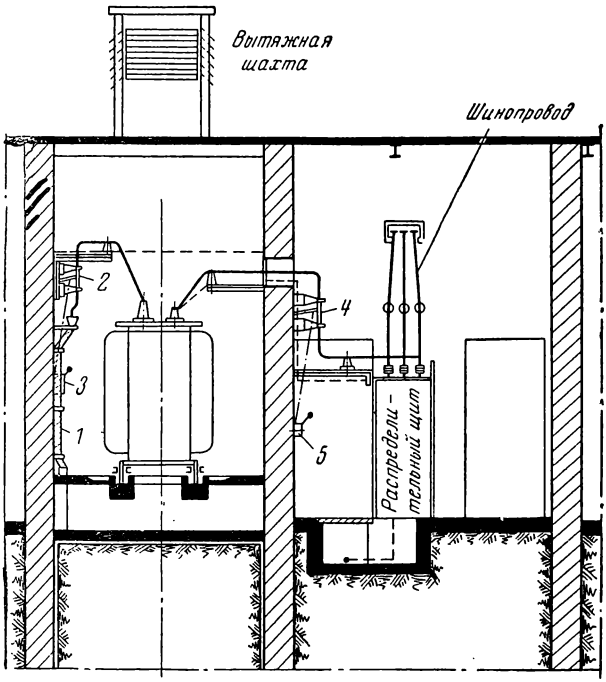


Рис. 19-23. Цеховая трансформаторная подстанция.

ним обслуживанием (рис. 19-24 и 19-25), каркасной или бескаркасной конструкции. В щитах каркасной конструкции применяются панели из листовой стали или листов изоляционного материала, например асбестоцемента. В бескаркасных щитах применяются панели только из листовой стали.

Простейшая электрическая схема щита: зажимы вторичной обмотки силового трансформатора цеховой подстанции через автомат или рубильник и

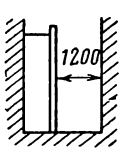


Рис. 19-24. Схема установки щита низкого напряжения с односторонним обслуживанием.

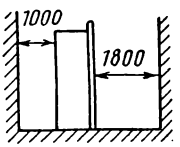


Рис. 19-25. Схемы установки щита низкого напряжения с двусторонним обслуживанием.

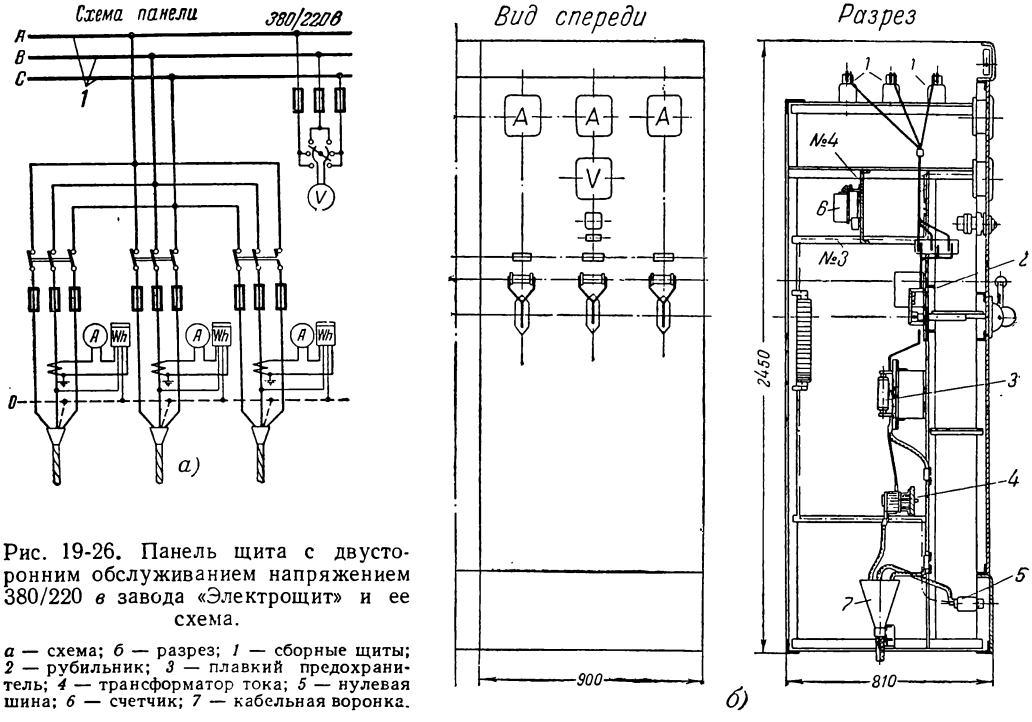


Рис. 19-26. Панель щита с двусторонним обслуживанием напряжением 380/220 *в* завода «Электрощит» и ее схема.

а — схема; *б* — разрез; *1* — сборные щиты; *2* — рубильник; *3* — плавкий предохранитель; *4* — трансформатор тока; *5* — нулевая шина; *6* — счетчик; *7* — кабельная воронка.

предохранители соединяются с шинами щита. От шин через рубильники и предохранители отходят линии для питания приемников энергии. Для измерений применяется вольтметр на шинах щита и амперметры на отходящих линиях.

Щит каркасного типа с двусторонним обслуживанием и схема одной из панелей показаны на рис. 19-26.

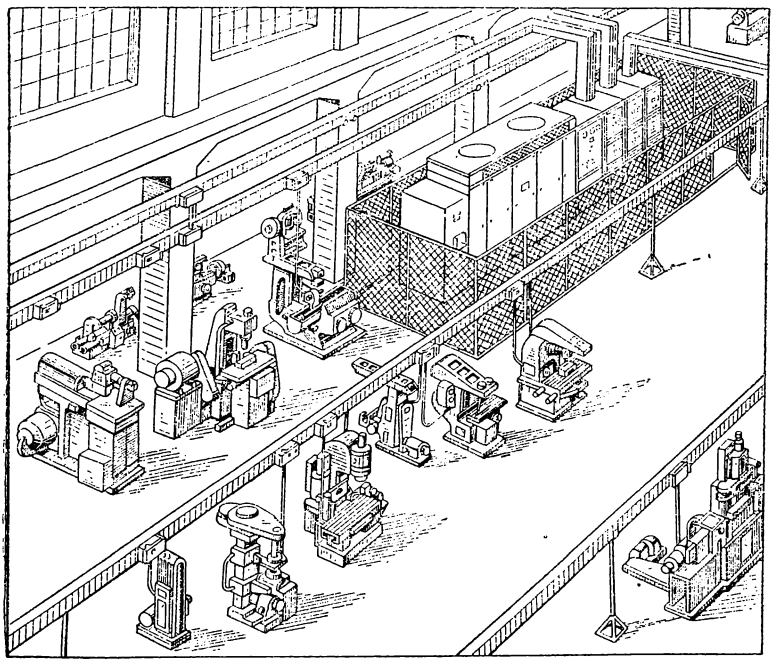


Рис. 19-27. Цеховая подстанция с шкафами КТП и шинопроводами.

Цеховая подстанция с шкафами КТП и шинопроводами показаны на рис. 19-27.

Ради удешевления применяется упрощенная схема цеховой подстанции в сочетании с шинопроводом, получившая название «блок трансформатор—магистраль» (рис. 19-28). В этой установке отсутствует распределительный щит. Ток от трансформатора через автомат или рубильник поступает непосредственно в шинопровод, а от него — к отдельным электродвигателям.

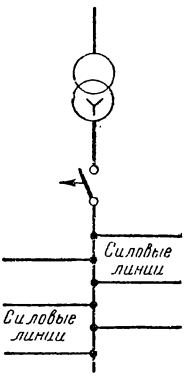


Рис. 19-28. Схема блока «трансформатор—магистраль».

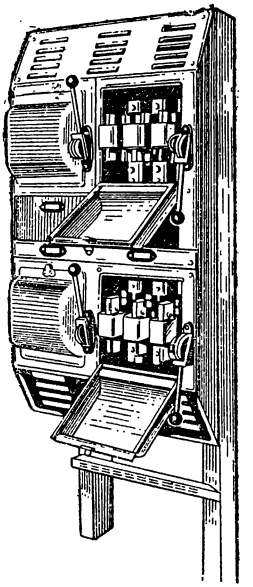


Рис. 19-29. Пункт распределительный блочный ПРБ-59 с четырьмя блоками.

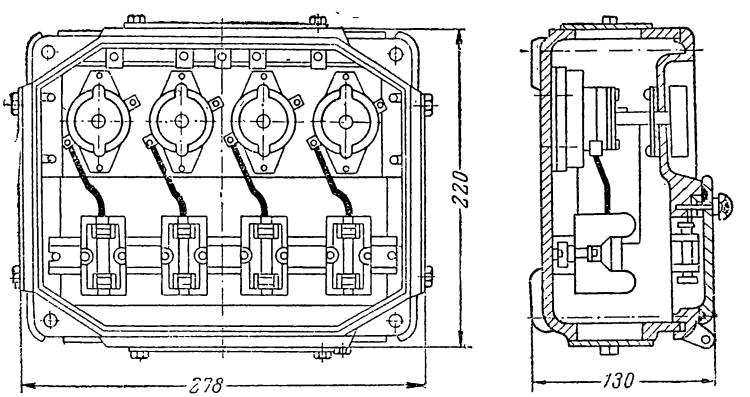


Рис. 19-30. Осветительный пункт.

Для питания небольших групп некрупных приемников в цехах устанавливаются распределительные пункты. На рис. 19-29 показан блочно-распределительный пункт ПРБ-59, собранный из отдельных блоков. В нем каждая отходящая линия включается и отключается независимо от других и смена предохранителей производится при отсутствии напряжения.

Питание осветительных приемников происходит через групповые распределительные пункты. Они представляют собой шкафы или ящики с смонтированными в них рубильниками или выключателями и плавкими предохранителями (рис. 19-30). В более мелких установках применяются щитки с плавкими предохранителями.

19-5. РАСЧЕТ ПРОВОДОВ

Электрические провода и сети должны: 1) обеспечить безопасность в пожарном отношении и в отношении жизни людей; 2) быть надежными в отношении бесперебойного снабжения электроэнергией; 3) обеспечить высокое качество энергии, определяемое малым отклонением подводимого к приемникам напряжения от номинального напряжения приемника; 4) быть дешевыми.

Выполнение первого условия обеспечивается правильным выбором сечения проводов по условию допустимого нагревания их, правильным выбором плавких предохранителей, а также выбором изоляции проводов, определяемой его маркой.

Второе условие выполняется достаточной механической прочностью проводов и правильным выбором плавкого предохранителя.

Выполнение третьего условия обеспечивается выбором сечения проводов по условию допустимой потери напряжения.

Расчет проводов имеет цель правильного выбора проводов.

а) Определение сечения проводов по допустимому нагреву

Для определения сечения проводов необходимо знать длины участков проводов и нагрузки на этих участках.

Нагрузка определяется мощностью или при неизменном номинальном напряжении соответствующим током.

При расчете проводов пользуются понятиями: 1) номинальная мощность $P_{\text{н}}$ — указанная на приемнике; 2) установленная мощность $P_{\text{у}}$ — сумма номинальных мощностей установленных приемников; 3) расчетная мощность $P_{\text{р}}$ — мощность, по которой производится расчет.

Перечисленным мощностям соответствуют токи: $I_{\text{н}}$, $I_{\text{у}}$, $I_{\text{р}}$, которым присваиваются те же дополнительные названия.

Практически никогда не включаются одновременно все приемники энергии, а двигатели, кроме того, не все время загружены полностью, поэтому при расчете исходят не из установленной мощности, а из той части ее — $P_{\text{р}}$, которая может одновременно использоваться потребителем.

Отношение расчетной мощности к установленной принято называть коэффициентом спроса

$$k_{\text{с}} = \frac{P_{\text{р}}}{P_{\text{у}}} \tag{19-1}$$

или

$$k_{\text{с}} = \frac{I_{\text{р}} U \cos\varphi}{I_{\text{у}} U \cos\varphi} = \frac{I_{\text{р}}}{I_{\text{у}}}.$$

При осветительной нагрузке:

а) для сетей наружного освещения $k_{\text{с}} = 1$; б) для сетей бытового освещения $k_{\text{с}} = 0{,}7$—$0{,}8$; в) для сетей промышленных предприятий $k_{\text{с}} = 0{,}7$—$0{,}9$.

При осветительной нагрузке расчетный ток для цепей однофазного переменного тока и для постоянного тока

$$I_{\text{р}} = \frac{k_{\text{с}} P_{\text{у}}}{U} = \frac{P_{\text{р}}}{U},$$

а для цепей трехфазного тока

$$I_{\text{р}} = \frac{k_{\text{с}} P_{\text{у}}}{\sqrt{3}\, U} = \frac{P_{\text{р}}}{\sqrt{3}\, U}.$$

При силовой нагрузке для цехов холодной обработки металлов в зависимости от числа установленных электродвигателей коэффициент спроса имеет значения, указанные в табл. 19-2.

Таблица 19-2

Коэффициент спроса в зависимости от числа двигателей

Число установленных двигателей	2	3	4	5	6	8	10	20	30
Коэффициент спроса для цехов холодной обработки металлов	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,45	0,3	0,25

Номинальный ток двигателя постоянного тока

$$I_{н} = \frac{P_{н}}{U \cdot \eta}, \qquad (19\text{-}2)$$

а двигателя трехфазного тока

$$I_{н} = \frac{P_{н}}{1{,}73 \cdot U \cdot \eta \cos \varphi}, \qquad (19\text{-}3)$$

где η — к. п. д. электродвигателя.

Значения η и $\cos \varphi$ для двигателей берутся из справочников или каталогов. При ориентировочных расчетах для двигателей небольшой мощности до 10—12 *квт* величину произведения $\eta \cos \varphi$ можно считать равной 0,7—0,8.

Расчетный ток двигателей

$$I_{р} = k_{с} I_{н} = k_{с} I_{у}.$$

Определение сечения проводов по допустимому нагреву их производится обычно по таблице (табл. 19-3), в которой для стандартных сечений различных марок проводов даются предельные длительные допустимые токи ($I_{д}$).

Допустимый ток провода должен быть не меньше расчетного, т. е.

$$I_{д} \geqslant I_{р}. \qquad (19\text{-}4)$$

Таким образом, выбирается провод того сечения, допустимый ток которого равен расчетному или несколько больше его.

Пример 19-1. Определить расчетный ток в магистральных проводах трехфазной линии напряжением 220 *в*, если на конце ее присоединены три электродвигателя с номинальной мощностью $P_{н1} = 4{,}5$ *квт*, $P_{н2} = 2{,}8$ *квт* и $P_{н3} = 3{,}5$ *квт*.

Выбрать сечение проводов марки ПР, проложенных в трубах, исходя из условий допустимого нагревания их.

Таблица 19-3

Допустимые длительные токовые нагрузки для изолированных проводов и кабелей с медными и алюминиевыми жилами

Сечение жилы, мм²	Допустимые длительные нагрузки, а*								
	в проводах марок ПР, ПРД, ПВ, ППВ, АПР, АПВ, проложенных открыто	в проводах и кабелях с медными жилами марок СРГ, СРБГ, ВРГ, ВРБГ, ТПРФ, ПРП, проложенных открыто		в проводах ПР, ПРТО, ПРГ, ПВ, ПГВ, АПР, АПВ в одной трубе и ППВ, проложенных скрыто				в кабелях с бумажной пропитанной изоляцией напряжением до 3 кв марок СБ, АБ, ВМБ, ААБ, АБМБ, проложенных в земле	в голых проводах на открытом воздухе, одножильных
		двухжильных	трехжильных	два провода	три провода	один двухжильный	один трехжильный	трехжильный	
0,5	11/—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,75	15/—	—	—	—	—	—	—	—	—
1	17/—	—	—	16/—	15/—	15	14	—	—
1,5	23/—	19	19	19/—	17/—	18	15	30	—
2,5	30/24	27	25	27/20	25/19	25	21	40/31	—
4	41/32	38	35	38/28	35/28	32	27	55/42	50/40
6	50/39	50	42	46/36	42/32	40	34	70/55	70/55
10	80/55	70	55	70/50	60/47	55	50	95/75	95/75
16	100/80	90	75	85/60	80/60	80	70	120/90	130/105
25	140/105	115	95	115/85	100/80	100	85	160/125	180/135
35	170/130	140	120	135/100	125/95	125	100	190/145	220/170
50	215/165	175	145	185/140	170/130	160	135	235/180	270/215
70	270/210	215	180	225/175	210/165	195	175	285/220	340/265
95	330/255	260	220	275/215	255/200	245	215	340/260	415/325
120	385/295	300	260	315/245	290/220	295	250	390/300	485/375
150	440/340	350	305	360/275	330/255	—	—	435/335	570/440

* В числителе приведена нагрузка для медных жил, в знаменателе — для алюминиевых жил.

Расчетный ток в магистрали

$$I_{\text{р}} = \frac{k_{\text{с}} P_{\text{н}} 1\,000}{1{,}73 U \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{0{,}9 \cdot 11{,}8 \cdot 1\,000}{1{,}73 \cdot 220 \cdot 0{,}7} = 30\ а.$$

Для найденного расчетного тока $I_{\text{р}} = 30\ а$ ближайшим допустимым током для проводов марки ПР, проложенных в трубах (табл. 19-3), будет ток $I_{\text{д}} = 35\ а$, которому соответствует сечение провода $S = 4\ мм^2$. Это сечение $S = 4\ мм^2$ и выбираем для заданных условий.

Выбранное сечение провода необходимо проверить по току плавкой вставки (§ 19-5, б) и по допустимой относительной потере напряжения (§ 19-5, в).

б) Выбор плавких вставок предохранителей

Плавкие вставки предохранителей предназначены для защиты проводов от токов короткого замыкания и больших перегрузок.

При прохождении токов выше расчетного плавкая вставка должна перегореть.

При выборе плавкой вставки исходят из трех условий:

1. Номинальный ток плавкой вставки $I_{\text{вст}}$ должен быть равен или больше расчетного тока защищаемого участка линии, т. е.

$$I_{\text{вст}} \geqslant I_{\text{р}}. \qquad (19\text{-}5)$$

Например, если $I_{\text{р}} = 30\ а$, то по шкале номинальных токов плавких вставок (табл. 19-4) выбираем ближайший номинальный ток вставки $I_{\text{вст}} = 35\ а$.

Таблица 19-4

Номинальные токи плавких вставок

Ток, *а*	4	6	10	15	20	25	35	45	60	80	100	125	160	200	252	260	300	350

2. Номинальный ток плавкой вставки $I_{\text{вст}}$ должен быть равен или больше величины пускового тока, уменьшенного в 2,5 раза для защищаемого участка линии, к которой присоединен один короткозамкнутый электродвигатель, т. е.

$$I_{\text{вст}} \geqslant \frac{I_{\text{пуск}}}{2{,}5}. \qquad (19\text{-}6)$$

Например, если $I_{пуск} = 200$ *а*, то

$$I_{вст} \geqslant \frac{200}{2{,}5} = 80 \text{ } а.$$

Ближайший номинальный ток плавкой вставки (табл. 19-4):

$$I_{вст} = 80 \text{ } а.$$

Номинальный ток плавкой вставки для линии, к которой присоединено несколько короткозамкнутых электродвигателей, производится по формуле

$$I_{вст} \geqslant \frac{I_{макс}}{2{,}5} = \frac{I_{пуск} + I'_{р}}{2{,}5}, \qquad (19\text{-}7)$$

где $I_{пуск}$ — пусковой ток того двигателя, который имеет больший пусковой ток;

$I'_{р}$ — расчетный ток линии без учета того двигателя, который имеет больший пусковой ток.

Выбирают плавкую вставку с большим током $I_{вст}$, найденным из условий 1 и 2.

Плавкая вставка, найденная по пусковому току (19-7), защищает линию от недопустимо больших кратковременных пусковых токов; для того чтобы плавкая вставка защищала линию и от длительных перегрузок, должно быть выполнено условие

$$3I_{д} \geqslant I_{вст}. \qquad (19\text{-}8)$$

Пример 19-2. Выбрать плавкую вставку по пусковому току для участка линии напряжением 220 *в*, на конце которой присоединены три короткозамкнутых электродвигателя: $P_{н1} = 4{,}5$ *квт*, $P_{н2} = 2{,}8$ *квт* и $P_{н3} = 3{,}5$ *квт*. Кратность пускового тока электродвигателей принимаем равной 7, произведение $\eta \cdot \cos \varphi = 0{,}7$.

Номинальные токи электродвигателей:

$$I_{н1} = \frac{P_{н1}}{1{,}73 \cdot U\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{4{,}5 \cdot 1\,000}{1{,}73 \cdot 220 \cdot 0{,}7} = 17 \text{ } а;$$

$$I_{н2} = \frac{P_{н2}}{1{,}73 \cdot U \cdot \eta \cos \varphi} = \frac{2{,}8 \cdot 1\,000}{1{,}73 \cdot 220 \cdot 0{,}7} = 10{,}5 \text{ } а;$$

$$I_{н3} = \frac{P_{н3}}{1{,}73 \cdot U \cdot \eta \cos \varphi} = \frac{3{,}5 \cdot 1\,000}{1{,}73 \cdot 220 \cdot 0{,}7} = 13{,}3 \text{ } а.$$

Расчетный ток линии при работающих двигателях *2* и *3*:

$$I_{р\,2,3} = k_с\,(I_{п2} + I_{п3}) = 1\,(10{,}5 + 13{,}3) = 23{,}8\ а.$$

Максимальный расчетный ток в линии при пуске двигателя *1*:

$$I_{макс} = I_{пуск\,1} + I_{р\,2,3} = 7 \cdot 17 + 23{,}8 = 142{,}8\ а.$$

Ток плавкой вставки [формула (19-7)]

$$I_{вст} \geqslant \frac{I_{макс}}{2{,}5} = \frac{142{,}8}{2{,}5} = 59\ а.$$

Выбираем вставку с ближайшим номинальным током $I_{вст} = 60\ а$.

3. При выборе плавких вставок предохранителей, последовательно установленных в сети, каждую следующую вставку, считая от приемника, следует выбирать на одну ступень выше по шкале стандартных токов плавких вставок (табл. 19-4). В этом случае обеспечивается селективная (избирательная) работа предохранителей, т. е. предохранитель будет отключать только тот участок, на котором произойдет короткое. Предохранитель должен устанавливаться в начале участка (считая по направлению движения энергии), так как только в этом случае он может защищать свой участок.

в) Выбор сечения проводов по допустимой потере напряжения

Как известно (§ 1-15), потерей напряжения называется арифметическая разность напряжений в начале и конце линии

$$\Delta U = U_1 - U_2.$$

Часто потерю напряжения выражают в процентах от напряжения в начале линии, называя ее относительной потерей напряжения

$$\varepsilon = \frac{\Delta U}{U} 100\%. \qquad (19\text{-}9)$$

Допустимая относительная потеря напряжения на участке от подстанции до потребителя для осветительной нагрузки составляет 2—3%, а для силовой 4—6%.

В § 1-15 была получена формула (1-43) для определения сечения проводов

$$S = \frac{2Il}{\gamma \Delta U}.$$

Заменив ΔU относительной потерей напряжения, получим:

$$S = \frac{2 \cdot 100 Il}{\gamma \varepsilon U},$$

или, умножив и разделив на U, придадим формуле другой вид

$$S = \frac{2 \cdot 100 Pl}{\gamma \varepsilon U^2}. \qquad (19\text{-}10)$$

Из последнего выражения следует, что

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot 100 Pl}{\gamma S U^2}. \qquad (19\text{-}11)$$

По формулам (19-10) и (19-11) определяют сечение проводов линии с нагрузкой на конце ее по заданной относительной потере напряжения или соответственно определяют относительную потерю напряжения в линиях по заданному сечению проводов.

Эти формулы можно применять для постоянного тока, для однофазного переменного и для трехфазного тока; в этом последнем случае напряжение U является линейным напряжением, т. е. $U = U_л$, а мощность P — активной мощностью трехфазной нагрузки.

Пример 19-3. Определить падение напряжения в линии трехфазного тока с напряжением $U = 220$ *в*, выполненной проводом ПР, длиной $l = 15$ *м*, сечением $S = 4$ *мм*^{2}, если на конце ее присоединены три электродвигателя мощностью $P_{н1} = 4{,}5$ *квт*, $P_{н2} = 2{,}8$ *квт* и $P_{н3} = 3{,}5$ *квт* (см. пример 19-1).

Мощность, потребляемая двигателями из сети при номинальной нагрузке их:

$$P = \frac{P_{н1}}{\eta_1} + \frac{P_{н2}}{\eta_2} + \frac{P_{н3}}{\eta_3} = \frac{4{,}5}{0{,}85} + \frac{2{,}8}{0{,}85} + \frac{3{,}5}{0{,}85} = 5{,}3 + 3{,}3 + 4{,}1 = 12{,}7 \text{ квт}.$$

Расчетная мощность

$$P_р k_с P = 0{,}9 \cdot 12{,}7 = 11{,}5 \text{ квт}.$$

Воспользовавшись формулой (19-11), напишем:

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot 100 Pl}{\gamma S U^2} = \frac{2 \cdot 100 \cdot 11{,}5 \cdot 1\,000 \cdot 15}{57 \cdot 4 \cdot 220^2} \approx 3\%.$$

Таким образом, относительная потеря напряжения не превышает допустимого и, следовательно, выбранное, по условиям допустимого нагревания, сечение провода $S = 4$ *мм*^{2} приемлемо.

Если линия, получающая энергию от питательного пункта A (рис. 19-31), имеет несколько нагрузок в разных точках ее, то при одинаковом сечении и материале всех участков линии определение сечения проводов производится по формуле

$$S = \frac{2 \cdot 100\,(P_1 l_1 + P_2 l_2 + P_3 l_3 + \ldots)}{\gamma \varepsilon U^2} = \frac{2 \cdot 100\,\Sigma\, Pl}{\gamma \varepsilon U^2}, \quad (19\text{-}12)$$

а относительная потеря напряжения

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot 100\,(P_1 l_1 + P_2 l_2 + P_3 l_3 + \ldots)}{\gamma S U^2} = \frac{2 \cdot 100\,\Sigma\, Pl}{\gamma S U^2}. \quad (19\text{-}13)$$

Две последние формулы отличаются от предыдущих тем, что выражение Pl — произведения нагрузки P и длины линии l, называемое м о м е н т о м н а г р у з к и, заменено суммой моментов нагрузок (рис. 19-31).

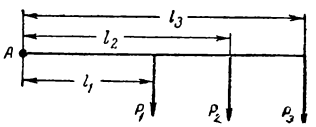


Рис. 19-31. Линия с тремя нагрузками.

Сечения проводов, найденные из условий допустимого нагрева, удовлетворяющие требованиям в отношении допустимой потери напряжения, проверяются по условиям механической прочности по табл. 19-5.

Т а б л и ц а 19-5

Наименьшие сечения проводов, допустимые по механической прочности

Наименование проводов и способы их прокладки	Сечение, мм²	
	медных проводов	алюминиевых проводов
Провода для зарядки светильников внутри и вне зданий	0,5; 1,0	—
Шнуры и легкие шланговые провода для подвесных, настольных и других светильников	0,75	—
Провода в среднем и тяжелом шланге для передвижных токоприемников . . .	1 и 2,5	
Скрученные многопроволочные двухжильные провода на изолирующих опорах при расстоянии между опорами 1 м	1,0	—

Продолжение

Наименование проводов и способы их прокладки	Сечение, *мм*²	
	медных проводов	алюминиевых проводов
Изолированные провода в зданиях на изолирующих опорах, расположенных друг от друга на расстоянии, *м*:		
до 1	1,0	2,5
» 2	1,5	2,5
» 6	2,5	4
» 12	4	10
более чем на 12	6	16
Голые провода в зданиях	2,5	4
Изолированные и голые защищенные провода в наружных проводках:		
по стенам	2,5	4
во всех других случаях	4	10
Изолированные провода в трубах	1	2,5
Воздушные линии до 1 000 *в*	6	16
Воздушные вводы при расстоянии до опоры 25 *м*	4	10

19-6. УСТРОЙСТВО СЕТЕЙ ВНУТРИ ЗДАНИЙ

Для канализации электрической энергии внутри зданий применяются провода, шнуры, кабели и шины.

Проводом называется отдельная проволока или жила — голая или изолированная. Изолированный провод может иметь резиновую, полихлорвиниловую, найритовую или хлопчатобумажную защитную оболочку.

Жилой называется одна или несколько скрученных между собой проволок, служащих проводниками электрического тока.

Шнуром называют систему двух или нескольких соединенных вместе изолированных гибких жил.

Кабелем называют одну или несколько скрученных вместе изолированных жил, заключенных в защитную герметичную свинцовую, алюминиевую или полихлорвиниловую оболочку.

Шиной называется полосовая, реже круглая медь, алюминий или сталь.

Провода и кабели различают по материалу жил (медь, алюминий — *А*), по конструкции (одно- и многожильные), по роду изоляции (резина — Р, полихлорвинил — В), по

роду защитной оболочки (свинцовая — С, алюминиевая — А и т. д.).

Таким образом, следует различать провода, шнуры и кабели одножильные и многожильные, т. е. такие, у которых для прохождения тока имеются один или несколько путей (жил), изолированных друг от друга. Как те, так и другие могут быть однопроволочными и многопроволочными.

Жилы изготовляются только стандартных сечений: 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240; 400; 500; 625 и 800 *мм*^{2}.

В силовых и осветительных установках наиболее часто применяются провода, шнуры и кабели следующих марок:

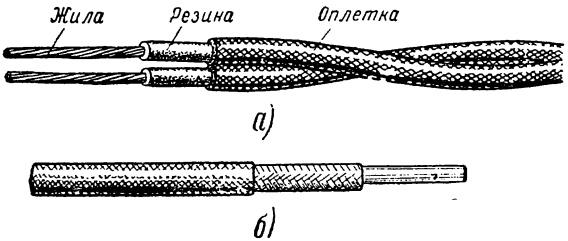


Рис. 19-32.

а — провод *ПРД* и шнур *ШР*; *б* — провод *ПР* и *АПР*.

1. *ПРД* — провод гибкий в оплетке из хлопчатобумажной пряжи с медной жилой, с резиновой изоляцией, двухжильный (рис. 19-32, *а*). Изготовляется сечением от 0,75 до 6 *мм*^{2}, для установок с напряжением до 380 *в*.

2. *ПР* и *АПР* — провода одножильные с резиновой изоляцией в оплетке из хлопчатобумажной пряжи; первый — медный, а второй — алюминиевый (рис. 19-32, *б*). Изготовляется сечением: первый от 0,75, а второй от 2,5 до 400 *мм*^{2}, для установок с напряжением до 500 *в*.

3. *ПРГ* — то же, что и *ПР*, но более гибкий с жилами из более тонких проволок.

4. *ПВ* и *АПВ* — провода, отличающиеся от проводов *ПР* и *АПР* только тем, что имеют полихлорвиниловую изоляцию. Изготовляются сечением от 0,75 до 95 *мм*^{2}, для установок с напряжением до 500 *в*.

5. *ПГВ* — провод гибкий с полихлорвиниловой изоляцией. Изготовляется тех же сечений, что и провод *ПВ*, для установок с напряжением до 500 *в*.

6. *ПРТО* и *АПРТО* — провод с резиновой изоляцией в общей оплетке из хлопчатобумажной пряжи. Изготовляется сечением от 1 до 500 *мм*² одно-, двух-, трех- и четырехжильным, для установок с напряжением до 500 и до 2 000 *в*.

7. *ПРП* — провод с резиновой изоляцией-панцирный, защитный; панцирь выполнен из тонких стальных оцинкованных проволочек. Изготовляется сечением от 1 до 95 *мм*² одно-, двух- и трехжильным, для установок с напряжением до 500 *в*.

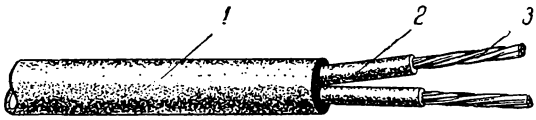


Рис. 19-33. Шнур *ШРПС*.

1 — резиновый защитный шланг; *2* — резиновая изоляция; *3* — медная жила.

8. *ТПРФ* — провод медный с резиновой изоляцией в трубчатой металлической оболочке. Изготовляется сечением от 1 до 10 *мм*² одно-, двух-, трех- и четырехжильным, для установок с напряжением до 500 *в*.

9. *ШР* — шнур с резиновой изоляцией, двухжильный; применяется в тех же случаях, что и *ПРД*, но отличается от последнего большой гибкостью (рис. 19-32, *а*).

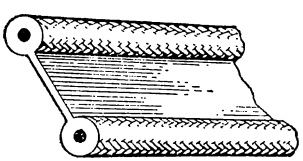


Рис. 19-34. Плоский двухжильный провод *ППВ* или *АППВ*.

10. *ШРПС* — шнур с резиновой изоляцией, переносный шланговый, средний (рис. 19-33). Жилы с изоляцией заключены в общую защитную резиновую оболочку. Изготовляется одно-, двух- и трехжильным сечением от 1 до 4 *мм*², на напряжение 500 *в*. Шнур предназначен для присоединения подвижных приемников (пылесосы, электроинструмент и т. д.).

11. *ППВ* и *АППВ* — провода плоские (рис. 19-34) двух- или трехжильные в полихлорвиниловой изоляции, с медными или алюминиевыми жилами (*АППВ*), сечением: первый 0,75—2,5 *мм*², второй 2,5—4 *мм*², для установок с напряжением до 500 *в*. В осветительных сетях эти провода почти полностью вытеснили применявшиеся ранее шнуры.

Таблица 19-6

Применение проводов основных марок

Род проводки	Способ прокладки	Марки провода	Характер помещения						
			Сухие		Влажное	Сырое	Пыльное	С химически активной средой	Наружные установки
			административно-бытовые	производственные					
Открыто на изолирующих опорах	На роликах	ПР; ПРД;	×	×	—	—	—	—	—
		ПР; АПР; ПВ; АПВ	×	×	×	×	—	—	×
	На изоляторах	ПР; АПР; ПВ; АПВ	×	+	+	+	×	+	+
		Голые провода	—	+	×	×	×	×	+
Открыто без изолирующих опор	По поверхности стен и потолков	ТПРФ	×	+	—	—	+	—	—
		ВРГ; СРГ; НРГ; АНРГ; ППВ; АППВ; АПН	×	+	+	+	+	×	×
			+	×	×	×	×	×	—
	В бумажных трубках с металлической оболочкой	ПР; АПР; ПВ; АПВ	×	×	—	—	×	—	—
	В стальных трубах	ПР; АПР; ПРТО; АПРТО; ПВ; АПВ	×	×	×	—	×	—	—
			×	+	×	×	×	×	×
	В коробах	ПР; АПР; ПРТО; ПВ; АПВ	—	+	×	—	×	—	—
Скрыто	В стеклянных трубах	ПР; АПР	+	×	—	—	×	—	—
	В стальных трубах	ПР; АПР; ПРТО; АПРТО	×	+	+	—	+	—	—
			×	×	+	+	+	×	×

Продолжение

Род проводки	Способ прокладки	Марки провода	Характер помещения						
			Сухие		Влажное	Сырое	Пыльное	С химически-активной средой	Наружные установки
			административно-бытовые	производственные					
Скрыто	В изоляционных полутвердых трубках	ПР; АПР	×	×	—	—	×	—	—
	В бумажных трубках с металлической оболочкой	ПР; АПР	×	×	×	—	×	—	—
	В строительных конструкциях и под штукатуркой	ППВ; АППВ; ПВ; АПВ; АПН	+	×	×	—	×	—	—

Условные знаки: + — рекомендуется; × — допускается; — — запрещается.

12. *АПН* — провод плоский двух- или трехжильный в найритовой изоляции с алюминиевыми жилами сечением 2,5—4 *мм*^{2}, с напряжением 500 *в*.

13. *СРБ* — кабели с резиновой изоляцией, медными жилами сечением 4—185 *мм*^{2}, освинцованные, с броней из стальных лент, поверх которых положена оболочка из кабельной пряжи. Номинальное напряжение 500 *в*.

14. *СРГ* — то же, что и СРБ, но без оболочки из пряжи.

15. *ВРГ* — кабель с резиновой изоляцией в полихлорвиниловой оболочке и *ВРБ* — то же, что и *ВРГ*, но с броней из стальных лент. Изготовляются двух-, трех- и четырехжильными с сечением жил от 1—185 *мм*. Номинальное напряжение 500 *в*.

16. *НРГ* и *АНРГ* — кабель: первый с медными, а второй с алюминиевыми жилами, с резиновой изоляцией в найритовой оболочке. Изготовляются одно-, двух-, трех- и четырехжильными с сечением жил 4—185 *мм*^{2}, на номинальное напряжение 500 *в*.

Применение и способы прокладки основных проводов и кабелей даны в табл. 19-6.

Ни одна проводка не может быть выполнена без соединения и оконцевания проводов.

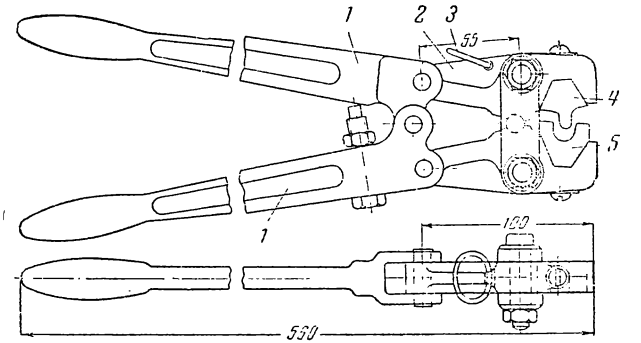


Рис. 19-35. Ручные клещи *ПК-1*.

1 — рукоятка; *2* — рычаг; *3* — кольцо; *4* — пуансон; *5* — матрица.

Оконцевание и соединение медных и алюминиевых многопроволочных жил проводов и кабелей выполняют опрессованием, сваркой или пайкой. Опрессование заключается в том, что токопроводящая жила вводится в трубчатую часть наконечника или в соединительную гильзу (трубку из того же материала, что и жила) и обжимается ручными клещами ПК-1, ПК-2 (рис. 19-35 и 19-36), или гидравлическим прессом. Наконечник опрессованный на жиле и процесс опрессования показан на рис. 19-37, при этом создается надежный электрический контакт между жилой и трубкой.

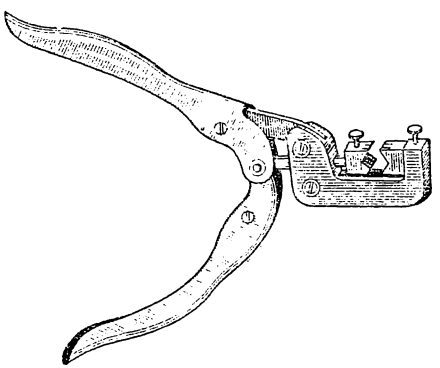


Рис. 19-36. Двухрычажные клещи типа *ПК-2*.

Оконцевание и соединение медных жил опрессованием выполняется одним обжатием — одним вдавливанием пуансона, а алюминиевых — двумя обжатиями (рис. 19-37). При опрессовании алюминиевых жил, для разрушения

оксидной пленки на поверхности жил, в наконечник или гильзу вводится паста, представляющая собой смесь мелкого кварцевого песка с вазелином. При опрессовании песчинки разрушают оксидную пленку, а вазелин не допускает нового окисления.

Метод опрессования является очень надежным, простым и удобным.

Электросварка применяется преимущественно для соединения и оконцевания алюминиевых жил. Часто сварка выполняется контактным разогревом, без образования дуги. При этом при прохождении тока выделяется тепло в месте соприкосновения угольного электрода с торцом расплавляемой жилы. Наварка

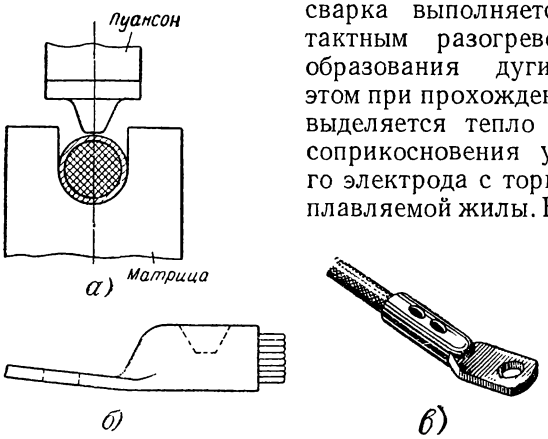


Рис. 19-37.

а — опрессование наконечника на жиле провода; *б* — наконечник опрессованный одним вдавливанием; *в* — наконечник опрессованный двойным вдавливанием.

наконечника на алюминиевую жилу показана на рис. 19-38. С одной стороны, подводка тока к жиле провода и защита изоляции его от перегрева производятся охладителем *4*. С другой стороны, ток от сварочного трансформатора к месту сварки поступает через клещи *5* и угольный электрод *6*.

При отсутствии возможности использовать опрессовку или сварку применяют пайку. Пайка медных жил производится в пламени паяльной лампы с применением оловянисто-свинцовых припоев и канифоли. Пайка алюминиевых жил выполняется с применением цинко-оловянистых припоев, которыми сначала облуживают поверхности сварки, а затем при соединении жил заливают формы или наконечники. При лужении оксидная пленка удаляется с разогретых поверхностей металлической кисточкой.

Соединение и ответвление медных гибких жил шнуров и проводов сечением до 10 *мм*^{2} выполняется следующим

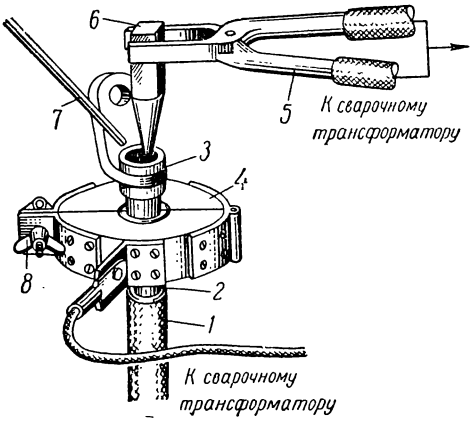


Рис. 19-38. Схема наварки алюминиевого наконечника на алюминиевую жилу.

1 — провод; *2* — оголенная алюминиевая жила; *3* — алюминиевый наконечник; *4* — охладитель; *5* — клещи; *6* — угольный электрод; *7* — присадочный алюминиевый пруток; *8* — зажим.

образом. Зачищенные концы соединяемых жил (рис. 19-39) укладываются в нахлестку, обертываются латунной или медной лентой, а затем обжимаются ручными клещами. Оконцевание таких жил выполняется с по-

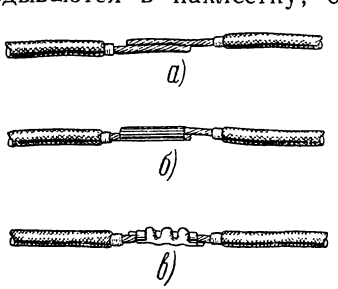


Рис. 19-39. Соединение медных жил обжатием в тонкой ленте.

а — подготовка соединяемых концов; *б* — обертывание тонкой медной лентой; *в* — соединение путем обжатия клещами.

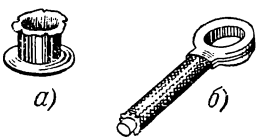


Рис. 19-40. Блочный наконечник.

а — до прессования; *б* — опрессован на колечке провода.

мощью блочных наконечников (рис. 19-40), обжимаемых на жиле ручными клещами.

Соединение однопроволочных алюминиевых жил проводов (сечением 2,5 *мм*^{2}), а также алюминиевых жил с медными выполняют электросваркой (рис. 19-41). Концы соединяемых жил скручивают и торцом прижимают к угольному электроду до сплавления их в «шарик».

Места соединений проводов изолируются прорезиненной лентой.

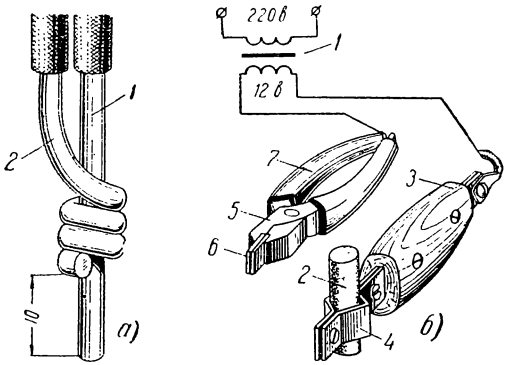


Рис. 19-41. Соединение однопроволочных медных и алюминиевых проводов электросваркой.

а — подготовка к сварке: *1* — медная жила; *2* — алюминиевая жила; *б* — схема электросварки: *1* — трансформатор; *2* — угольный электрод; *3* — электрододержатель; *4* — медный зажим электрода; *5* — плоскогубцы; *6* — медные губки; *7* — изоляционные трубки на ручках плоскогубцев.

Силовые сети предприятий наиболее часто выполняются: 1) кабелем; 2) шинами; 3) изолированным проводом в трубах и на изоляторах.

Осветительные сети предприятий преимущественно выполняются: 1) проводом в металлических трубах; 2) проводом на изоляторах или роликах (открытая проводка) и на тросах (тросовая проводка).

Внутри зданий кабели прокладываются с меньшим количеством обходов кабелями трубопроводов и конструкций, проходов кабелей через стены и перекрытия, а также с учетом иметь свободный доступ к кабелям на случай ремонта.

Кабели прокладываются открыто или скрыто. В первом случае они прокладываются по стенам или потолкам на опорных конструкциях или закрепляются скобами

(рис. 19-42). Во втором случае кабели прокладываются в каналах, устраиваемых в полу (рис. 19-43). Оконцевание кабелей рассмотрено выше в § 19-2.

Шинопроводы бывают открытыми и закрытыми. Открытый шинопровод (рис. 19-44) представляет

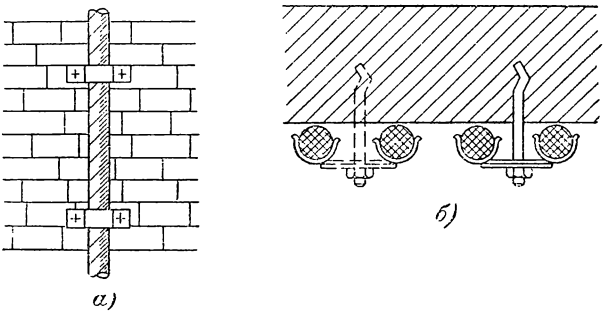


Рис. 19-42. Крепление кабеля.
а — на стене; *б* — на потолке.

собой шины, закрепленные на изоляторах, которые монтируются на металлических конструкциях, укрепляемых на стенах, колоннах, потолках или фермах. Ответвления к приемникам энергии выполняются проводами или кабелями, кабельные наконечники которых болтами крепятся к шинам.

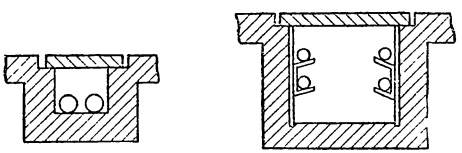


Рис. 19-43. Прокладка кабелей в каналах.

Закрытые шинопроводы представляют собой шины, расположенные на изолирующих гребенках внутри стального короба (рис. 19-45) или трубы. Они обычно собираются из отдельных нормальных секций длиной 3 *м*. Ответвления от шинопровода выполняются при помощи коробок или ящиков, укрепляемых на коробе. Ящики содержат или только зажимы для присоединения проводов, или

трубчатые предохранители и зажимы, от которых по изолированным проводам, расположенным в стальных трубах или металлических рукавах, отводится ток к приемникам энергии. Шинопроводы крепятся на стойках из газовых труб (рис. 19-46), кронштейнах, расположенных на стенах или колоннах (рис. 19-27), или подвешиваются на стальных растяжках к фермам.

В силовых сетях широко применяется прокладка проводов в трубах. Для взрыво- и пожароопасных помещений такая прокладка обязательна. В последнем случае трубопроводы должны быть герметичными, а аппаратура и светильники — взрывобезопасными.

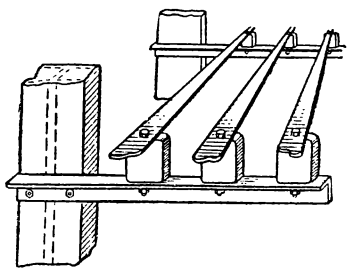


Рис. 19-44. Открытый шинопровод.

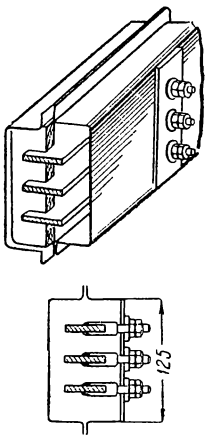


Рис. 19-45. Закрытый шинопровод.

В цехах и машинных залах с разветвленной сетью трубы прокладывают скрыто — в полу. Соединения и ответвления проводов, проложенных в стальных трубах, выполняются в специальных коробках или ящиках.

Прокладка изолированных проводов на роликах и изоляторах, так же как и шнуровые проводки, в настоящее время применяются редко.

В осветительных сетях промышленных предприятий широко применяются тросовые проводки. Различные варианты исполнения тросовой проводки показаны на рис. 19-47. Тросовые проводки заготавливают заранее с подвешенными светильниками и закрепленными проводами и на месте монтажа подвешивают их с помощью специальных натяжных устройств, закрепляемых в конечных точках пролета.

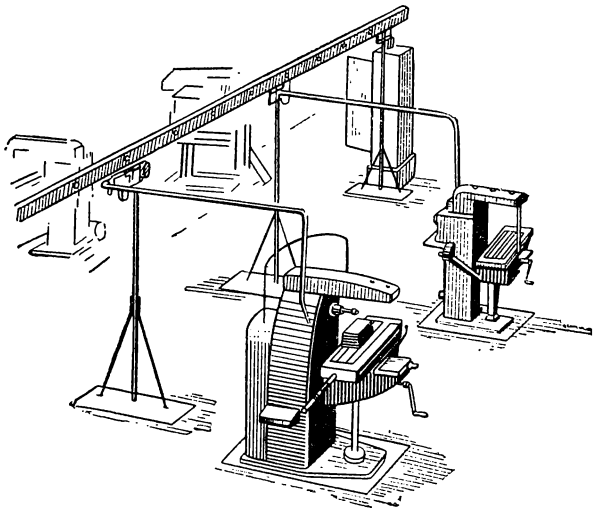


Рис. 19-46. Крепление закрытого шинопровода на стойках из газовых труб.

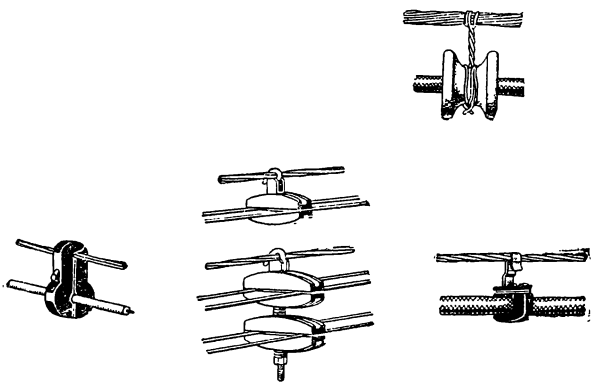


Рис. 19-47. Различные выполнения тросовой проводки изолированными проводами.

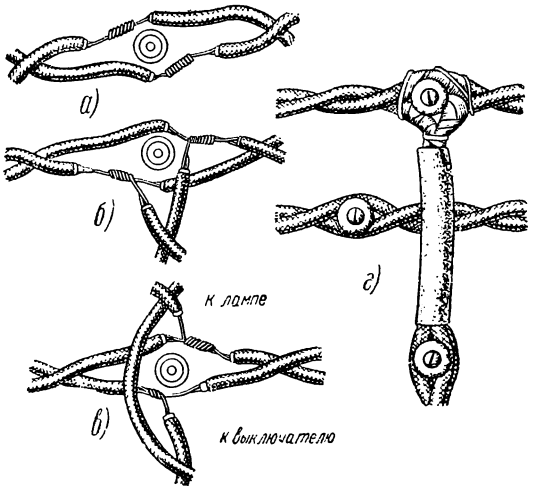


Рис. 19-48. Прокладка шнура *ШР* или провода *ПРД*.

а — соединение шнуров; *б* — ответвление к штепсельной розетке; *в* — ответвление к лампе и выключателю; *г* — пересечение шнуровой проводки.

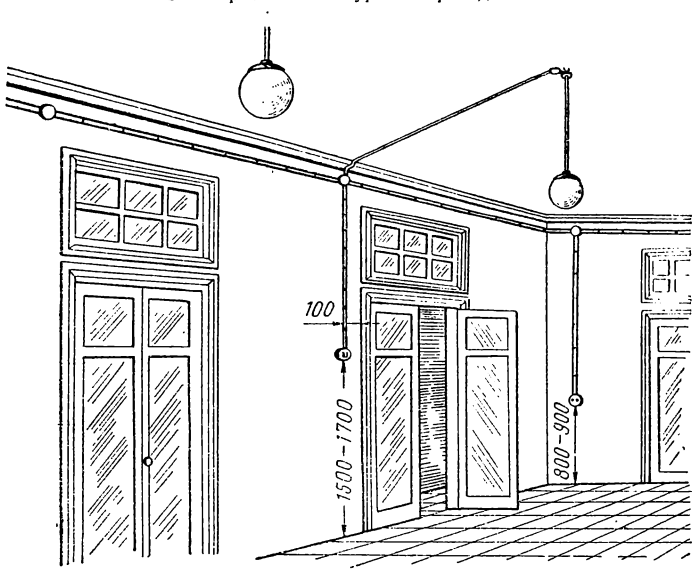


Рис. 19-49. Общий вид прокладки проводом марки *ППВ*.

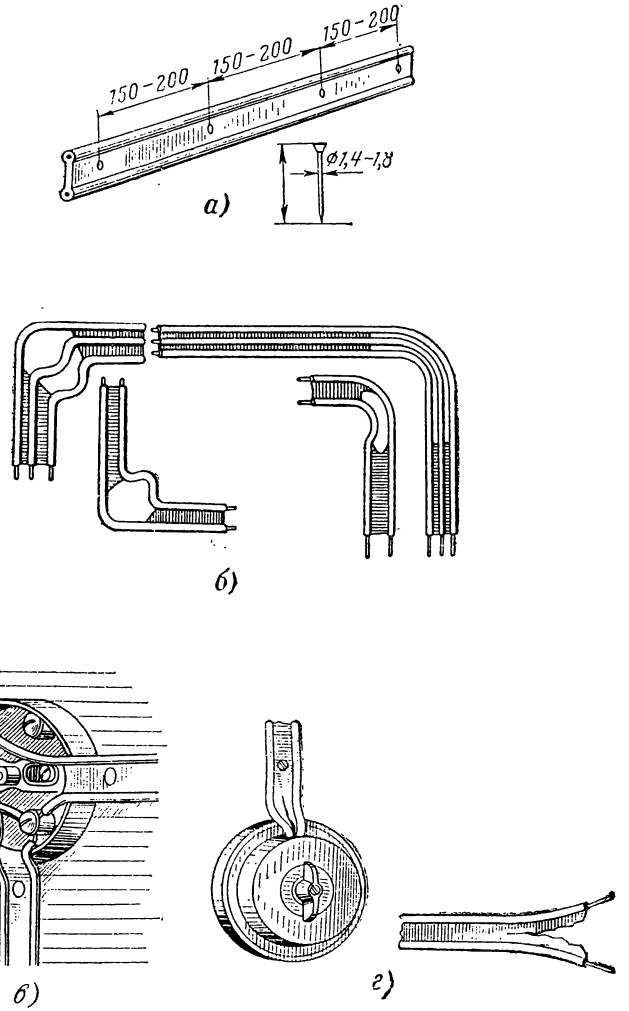
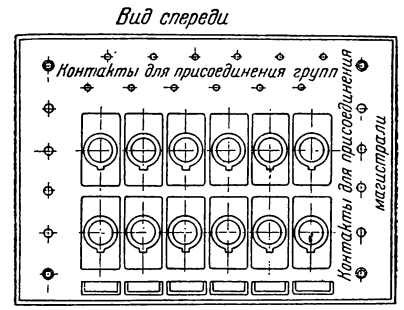


Рис. 19-50. Прокладка проводом *ППВ*.

а — прямолинейный участок; *б* — выполнение изгибов провода; *в* — коробка для соединения и ответвления провода; *г* — присоединение провода к выключателю.

В последнее время для тросовых проводок применяются специальные тросовые провода, представляющие собой единое конструктивное целое проводов с изолированным тросом. Ответвления от таких проводов выполняются в коробках, укрепляемых в нужных местах на тросе.

Шнуровые проводки на роликах (рис. 19-48) применяются редко. Для осветительных сетей бытовых помещений в настоящее время применяются плоские провода марок ППВ и АППВ. Они прокладываются как скрыто, так и открыто.



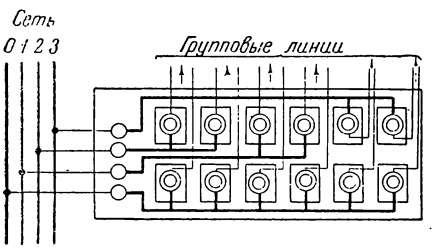


Рис. 19-51. Осветительный групповой щиток.

Плоские провода очень удобны и просты для монтажа. При скрытой проводке они прокладываются непосредственно под штукатуркой без каких-либо дополнительных защитных оболочек. При открытой проводке они крепятся на стенах и потолках специальными сортами клея или просто гвоздями. Соединения и ответвления плоских проводов при той и другой прокладке проводов производятся в пластмассовых или стальных коробках. Общий вид проводки проводом марки ППВ или АППВ показан на рис. 19-49, а на рис. 19-50 показаны некоторые детали такой проводки.

Осветительная сеть, помимо проводов, содержит патроны для ламп, штепсельные розетки, выключатели и плавкие предохранители или автоматические выключатели (автоматы), предназначенные для защиты сети от коротких замыканий.

Несколько предохранителей, смонтированных на общем основании, составляют групповой щиток (рис. 19-51).

На рис. 19-52 показаны простейшие схемы включения ламп накаливания. Схемы даны в однолинейном и многолинейном изображении. В схемах однолинейного изображения поперечными черточками показано число проводов на каждом участке схемы.

На рис. 19-53 дана однолинейная схема осветительной проводки цеха. Пользуясь схемами рис. 19-52, не представит большого труда нарисовать многопроводную схему той же установки.

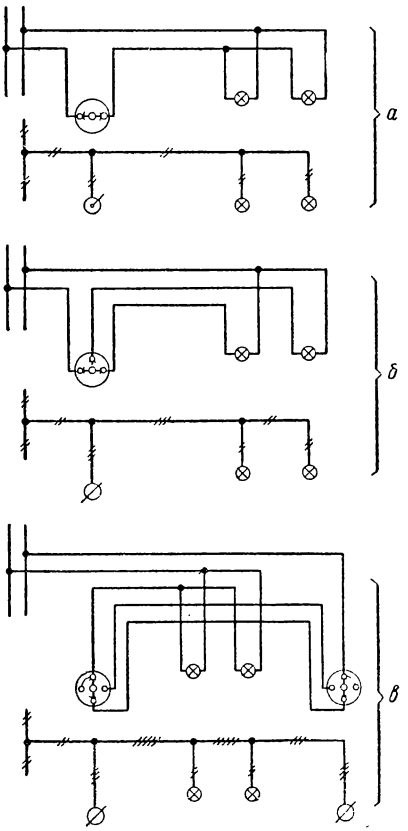


Рис. 19-52. Схема включения ламп в однолинейном и многолинейном изображении.

а — схема включения одной или нескольких ламп выключателем; *б* — схема включения одной, второй или двух ламп переключателем; *в* — схема включения одной или нескольких ламп переключателями из двух мест.

19-7. УХОД ЗА ЭЛЕКТРООСВЕТИТЕЛЬНЫМИ УСТАНОВКАМИ

Электроосветительные установки требуют систематического наблюдения и ухода.

Периодически не реже 1 раза в квартал следует производить осмотр проводки, всей аппаратуры и измерять сопротивление ее изоляции. При осмотре необходимо выявлять и устранять все недостатки, например обвисшие провода, плохие контакты в выключателях, патронах, групповых щитках. Следует проверять также загрузку отдельных фаз и при большой неравномерности перераспределить нагрузку.

Неисправности, плохое состояние светильников, их загрязненность уменьшают освещенность, снижают произ-

водительность труда, вредно отражаются на зрении и вызывают непроизводительные затраты. Поэтому следует регулярно следить за светильниками, протирать и чистить все

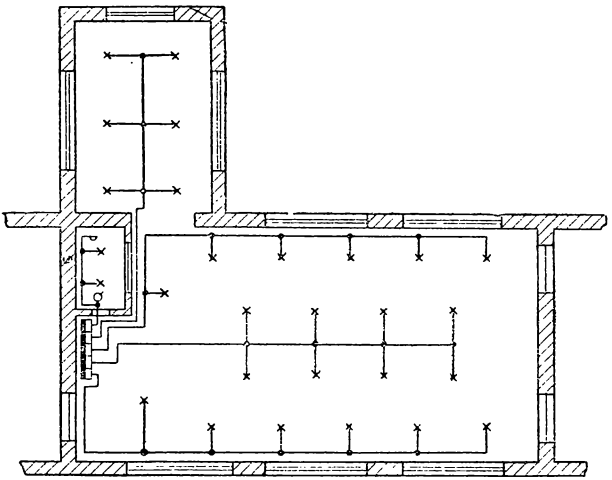


Рис. 19-53. Схема осветительной проводки цеха предприятия.

части светильника и лампы. Светильники протирают сухой тряпкой или слегка смоченной керосином. Особо следует следить за состоянием контакта между патроном и лампой. Эту чистку следует производить 1—3 раза в месяц в зависимости от запыленности помещения.

Приложение

УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Для выполнения лабораторных работ учебная группа (25—30 чел.) делится на две подгруппы, которые занимаются раздельно каждая с одним преподавателем.

В подгруппе образуются бригады из учащихся в составе 2—4 чел. в каждой. Бригады поочередно выполняют все работы, предусмотренные программой. Выполнение лабораторных работ целесообразно начать после изучения первого раздела программы — «Основы электротехники и электрические измерения». Большое значение для улучшения качества выполнения лабораторных работ имеет предварительная подготовка учащихся. Учащийся должен заранее, по крайней мере за неделю, знать, какую работу он будет выполнять. Учащийся должен повторить теоретический материал по учебнику, ознакомиться с планом выполнения работы, выяснить цели и задачи, поставленные в лабораторной работе. Каждый учащийся должен иметь рабочую тетрадь, в которую в результате предварительной подготовки записываются: план выполнения работы, перечень необходимой аппаратуры и оборудования, электрические схемы, соединения, расчетные формулы, таблицы и пр.

При выборе аппаратуры на рабочем столе необходимо приближенно (с точностью до 10%) рассчитать токи и напряжения во всех участках цепи для наибольшей и наименьшей мощностей. По полученным данным подобрать аппаратуру, необходимую для выполнения работы, и записать ее технические данные. После выбора аппаратуры следует составить план расположения аппаратуры на рабочем столе. При этом измерительные приборы, вспомогательные и регулирующие устройства следует располагать так, чтобы будущая схема соединения получилась наиболее простой и наглядной, а отсчеты и регулировка были удобными и не требовали лишних движений или неудобных положений для наблюдателя. Перед монтажом схемы необходимо ознакомиться с электрическими схемами приборов, аппаратов и машин и с схемами их включения. При этом нужно выявить, какие зажимы прибора или машины соответствуют тем или иным точкам электрической схемы и в какие положения должны быть поставлены движки реостатов и рукоятки регулирующих устройств. Необходимо всегда стремиться к такому соединению элементов электрической схемы, чтобы цепь получилась наиболее простой и наглядной. Выполнению этого требования способствует не только удобное расположение приборов, но также и выбор соединительных проводов. Длина проводов должна соответствовать расстоянию между соединительными

зажимами. Провода, по которым идет рабочий ток, рекомендуется выбирать одного цвета с сечением, соответствующим току. Вспомогательные цепи (параллельные цепи ваттметров и счетчиков и др.) рекомендуется соединять проводами другого цвета и меньшего сечения.

При соединении электрической цепи целесообразно сначала соединять главную (последовательную) цепь, а затем параллельные ветви. Монтаж электрической цепи производит один из членов бригады. Другие члены бригады проверяют собранную цепь. Последующие электрические цепи поочередно собирают другие члены бригады. Проверка электрической цепи производится путем обхода главного контура, а затем всех параллельных ветвей. В результате проверки необходимо убедиться в достаточной плотности всех зажимов и в правильном положении движков реостатов и рукояток регулирующих устройств, а также в том, что стрелки всех измерительных приборов стоят на нулевых отметках шкалы.

После проверки собранной электрической цепи членами бригады она обязательно должна быть проверена преподавателем, только с его разрешения цепь может быть включена под напряжение. После замыкания рубильника рекомендуется произвести все необходимые регулировки и установить поочередно все необходимые режимы, произведя предварительно только наблюдения (без записей) и только затем вторично получить все нужные режимы, произведя наблюдения и записи в рабочую тетрадь.

Работать в лаборатории следует крайне осторожно и каждый раз предусматривать, какие последствия вызывает каждое изменение режима цепи.

При выполнении работы необходимо следить за соблюдением правил безопасности. Категорически воспрещается касаться руками неизолированных проводов и зажимов, когда цепь находится под напряжением. Особенно осторожно нужно работать с цепями переменного тока, содержащими катушки и конденсаторы, в которых по ходу выполнения задания может получиться резонанс напряжения. В таких цепях напряжение может значительно превысить напряжение сети.

Когда выполнены все необходимые наблюдения и расчеты, полученные результаты показываются преподавателю, который в случае удовлетворительного выполнения работы дает разрешение на ее окончание. После этого цепь разбирается. Зажимы у приборов поджимаются, провода аккуратно складываются на места.

По каждой выполненной работе каждым учащимся составляется отчет. Отчеты выполняются на специальных бланках или листах клетчатой бумаги. Отчет должен быть выполнен тщательно и аккуратно. Отчет должен содержать:

1) наименование работы и ее номер;

2) фамилию и инициалы учащегося, наименование группы и дату выполнения работы;

3) перечень приборов и аппаратов и их краткие технические характеристики;

4) краткое описание работы;

5) схемы соединения;

6) результаты наблюдений и расчеты, записанные в таблицы;

7) графики;

8) заключение.

○

Попов Виктор Степанович,
Николаев Сергей Александрович

Электротехника

М.—Л., издательство «Энергия»,
1966, 600 с. с черт.

Тематический план 1966 г., № 143

Редактор *А. Д. Смирнов.*
Технический редактор *О. П. Печёнкина*

Сдано в набор 30/VI 1965 г. Подписано к печати 21/X 1965 г. Т-10 145. Формат 84×108¹/₃₂. Печ. л. 31,5. Уч.-изд. л. 30,74. Допечатка тиража 100 000 экз. Цена 1 р. 69 к. Зак. 148.

Ленинградская типография № 1 «Печатный Двор» имени А. М. Горького Главполиграфпрома Государственного комитета Совета Министров СССР по печати, Гатчинская, 26.

Издательство «Энергия» в 1966 г. выпустит в свет **«Альбом чертежей для деталировок по электротехнике и радиоэлектронике»** (автор М. С. Букштейн), изд. 2-е, переработанное, 100 л., 10 000 экз., ц. 3 р. 75 к. в папке.

Альбом состоит из 100 чертежей и пояснительного текста. На чертежах даны общие виды и деталировка электротехнических приборов и аппаратов, применяемых в электротехнике, автоматике и радиоэлектронике. Даны также контрольные вопросы — задания.

Альбом предназначается в качестве учебного пособия для студентов вузов и техникумов и может быть полезен инженерно-техническим работникам, занимающимся проектированием электрооборудования.

Издательство заказов не принимает.

С заказами следует обращаться в местные книжные магазины или в организацию «Книга-почтой» (Москва, ул. Медведева, д. 1. Магазин № 8 Москниги).

Цена 1 р. 60 к.